

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
MATERIAALI- JA KALLIOTEKNIIKAN OSASTO
METALLURGIAN LABORATORIO

Sami Ahonen

**ERI TEKIJÖIDEN VAIKUTUS JÄHMETTYMISONKALON
SUURUUTEEN IMATRA STEELIN BLOOMIVALUSSA**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten Espoossa 4.4.2000.

Työn valvoja:

Professori Lauri Holappa

Työn ohjaajat:

TkT Seppo Louhenkilpi

DI Tenho Hätönen

DI Antti Muranen

Teknillinen korkeakoulu
Materiaali- ja kalliotekniikan
osaston kirjasto
PL 6200 (Vuorimiehentie 2)
02015 TKK

Tekijä:	Sami Ahonen
Työn nimi:	Eri tekijöiden vaikutus jähmettymisonkalon suuruuteen Imatra Steelin bloomivalussa
Päivämäärä:	4.4.2000
	Sivumäärä: 81 + 6
Osasto ja koulutusohjelma:	Professuuri:
Materiaali- ja kallioteekniikan osasto	Mak-37 Metallurgia
Työn valvoja:	Professori Lauri Holappa
Työn ohjaajat:	TkT Seppo Louhenkilpi, DI Tenho Hätönen, DI Antti Muranen
Avainsanat:	Jähmettyminen, pipe, keskustahuokoisuus, jatkuvavalu, bloomi
<p>Työn tarkoituksena oli selvittää jähmettymisonkalon eli pipen esiintymistä ja pipen suuruuteen vaikuttavia tekijöitä Imatra Steelin bloomivalulla. Pipeä tutkittiin lähinnä sulatuksen viimeisistä bloomeista valssattujen teelmien ultraäänitarkastuksella. Tarkasteltavana oli teelmiä kolmelta eri hiilialueelta. Työn tavoitteena oli lopulta vähentää pipen muodostumista valuprosessin liitospraktiikkaa parantamalla.</p> <p>Työn kirjallisuusosassa on tarkasteltu teräksen jähmettymisteoriaa, jähmettymisrakenteita jatkuvavalussa ja pipen muodostumista sekä siihen vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi kirjallisuusosassa esiteltiin käytössä olevia menetelmiä pipen vähentämiseksi.</p> <p>Työn kokeellisessa osassa suoritettiin erikoiskoe, 16 aineistokoetta ja kaksi jatkokoetta. Kokeiden alussa tehdyssä erikoiskokeessa bloomista sahatuista ja halkaistuista paloista nähtiin erittäin havainnollisesti pipen muoto ja suuruus. Aineistokokeissa selvitettiin erityisesti hiilipitoisuuden vaikutusta pipen suuruuteen. Samalla tutkittiin muiden tekijöiden kuten valunopeuden, sulan yllilämmön ja loppuromun pituuden vaikutusta pipen suuruuteen. Jatkokokeissa kokeiltiin erilaista loppuporrastusmenetelmää ja kokeiltiin myös jäähdytyspaineilman poisottamista liitoksen tekoajaksi.</p> <p>Koetulokset osoittivat sulakartion pituuden olevan kaikkein merkittävin tekijä pipen muodostumiselle. Pitkällä sulakartiolla valun lopetushetkellä saatiin kokeissa kaikkein suurimmat pipet. Sulakartion pituuteen suoraan vaikuttavalla valunopeudella oli myös vaikutusta pipen suuruuteen. Uudella lopetusporrastuksella saatiin sulakartiota lyhennettyä niin hyvin, että valukoneen selvästä pipehavainnosta huolimatta jopa nykyistä lyhyemmällä loppuromutuksella saatiin pipe poistettua kokonaan. Jälkimmäisen jatkokokeen jäähdytyksen muuttamisella näytti olevan vaikutusta. Hiilipitoisuuden vaikutus oli erityisesti matalahiilisten ($\approx 0.15\%$) teräslaatujen osalla huomattava, sillä niillä ei pipeä havaittu ollenkaan. Korkeammalla hiilipitoisuudella ja erityisesti 0.25% hiiltä sisältävillä laaduilla havaittiinkin aineistokokeiden kaikki pahimmat pipet.</p>	

Author:	Sami Ahonen		
Name of the thesis:	The effect of various factors to pipe formation at Imatra Steel's bloom casting		
Date:	April 4, 2000	Number of Pages:	81 + 6
Faculty:	Department of Materials Science and Rock Engineering		
Chair:	Mak-37 Metallurgy	Language:	Finnish
Supervisor:	Professor Lauri Holappa		
Instructors:	Seppo Louhenkilpi Dr. Tech., Tenho Hätönen M.Sc., Antti Muranen M.Sc.		
Keywords:	Solidification, pipe, center porosity, bloom, continuous casting		
<p>The purpose of the thesis was to find out the factors which have an effect on the formation of shrinkage cavities also known as pipes. The final objective was to improve the practice at the continuous caster during the end of the casting to decrease the length of the pipe.</p> <p>In the theoretical part of the thesis a literature study on solidification theory, solidification at the bloom caster and pipe formation are presented. Different practices to decrease the pipe are also presented.</p> <p>In the experimental part of the thesis three types of experiments were made. In one experiment a bloom was cut in pieces which then were cut along the centerline of the bloom examine the shape of the pipe. From 16 heats the billets of last blooms were collected. These billets were inspected by ultrasonic inspection and the appearance of pipes was recorded. In these experiments the heats were divided into three groups by the carbon content. Finally, two experiments were made in which a new practice to decrease the casting speed was used at the end of the casting.</p> <p>Results of the experimental part show that the most important factor to the length of the pipe was the length of the liquid crater at the end of the casting. In all experiments the worst pipes were achieved when the length of the liquid steel was the largest. Casting speed and super heat in the tundish were also relevant factors. Carbon content had also importance to the length of the pipe. With lower carbon content ($\approx 0.15\%$) no pipe was found in the billets. All the pipes that led to scrapping were among the higher carbon grades, especially steels with 0.25% carbon being most sensitive for pipe formation. When using a new practice at the end of the casting very good results were achieved. The pipe was shorter and it could be eliminated by shorter scrap cutting from the end of the bloom.</p>			

Sisällysluettelo

I Kirjallisuusosa

1	Johdanto	1
2	Jähmettymisteoria.....	2
2.1	Tilavuuden muutokset.....	2
2.2	Raudan ja teräksen jähmettyminen	3
3	Pipe ja siihen vaikuttavat tekijät	6
3.1	Termeistä.....	6
3.2	Pipen muodostuminen.....	7
3.3	Jäähdytys.....	9
3.4	Jähmettymisrakenteet jatkuvavalussa	11
3.5	Siltojen muodostuminen	14
3.6	Teräksen analyysi ja puuroalue.....	16
3.7	Valunopeus ja valulämpötila.....	19
3.8	Valun lopetus	23
3.9	Muita pipen muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä	23
4	Pipen vähentäminen	25
4.1	Yleistä	25
4.2	Terminen softreduktio (TSR).....	26
4.3	Mekaaninen softreduktio (MSR)	27
4.4	Taonta ja tasopuristus	31
4.5	Sähkömagneettiset sekoittimet (EMS).....	32
4.6	Valaminen lähellä likviduslämpötilaa.....	33

II Kokeellinen osa

5	Aineisto ja tutkimusmenetelmät.....	36
5.1	Kokeet.....	36
5.2	Valukone	37
5.3	Pipen muodostuminen valun eri vaiheissa.....	39
5.4	Pipetapausten esiintyminen bloomivalukoneella.....	40
5.5	CASIM.....	41
6	Tutkimustulokset.....	42
6.1	Prosessidatan analysointi	42
6.2	Erikoiskoe	47
6.3	Aineistokokeet	54
6.4	Jatkokokeet	63
7	Pohdinta ja johtopäätökset	73
8	Yhteenveto	76
	Lähdeviitteet	77

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty aikavälillä 6.9.1999-29.3.2000 Imatra Steelin terästehtaalla ja Teknillisen Korkeakoulun metallurgian laboratoriossa.


Imatra Steeliltä kiitoksen ansaitsevat erityisesti työni ohjaajat Tenho Hätönen ja Antti Muranen työn suorittamisen ja varsinkin kokeellisen osan erinomaisesta suunnittelusta. Lisäksi haluan kiittää kaikkia henkilöitä tehtaalla, erityisesti BLV:lla, KV:lla ja TEK:ssä positiivisesta suhtautumisesta kokeisiin.

Metallurgian laboratoriosta haluan kiittää professori Lauri Holappaan työn tarkastamisesta ja Seppo Louhenkilpeä työn tarjoajana ja loistavana ohjaajana eri vaiheissa. Lisäksi kiitoksen sana Heli Kytöselle artikkelikokoelman lainasta ja TEMPSIMU-osaamisesta.

Haluan myös kiittää vanhempiani ja siskoani sekä isovanhempiani kannustamisesta opiskeluun.

Lopuksi kaikkein suurin kiitos Katjalle, koska jaksoit Imatran-matkailun ja erityisesti työn loppuvaiheen 14-tuntiset työpäivät erittäin hyvin ja vielä muistit kannustaa aina opinnoissa ja diplomityön tekemisessä.

Otaniemessä, 29. Maaliskuuta 2000


Sami Ahonen

1 Johdanto

Terästeollisuuden jatkuva pyrkimys yhä laadukkaampiin ja koostumukseltaan homogeenisempiin tuotteisiin on asettanut erityisen suuria vaatimuksia myös jatkuvavaluteknologian kehittämiseksi. Erilaiset valuaihioiden viat ovat todella hankalia. Näistä erityisesti sisäviat ovat vaikean havaittavuutensa takia ongelmallisia. Sisävioiksi lasketaan sisähalkeamat, voimakas seosaineiden suotautuminen ja keskustahuokoisuus. Voimakkain keskustahuokoisuuden muoto on jähmettymisonkalot, joita tässä työssä on tutkittu.

Jähmettymisonkalo muodostuu jähmettymiskutistumisen ja negatiivisen lämpölaajenemisen eli jäähtymiskutistuman seurauksena. Nämä onkalot sijaitsevat joko avonaisina valutuotteen päässä tai suljettuina valutuotteen sisällä. Molemmissa tapauksissa nämä valutuotteiden sisäiset onkalot ovat pahimman luokan vikoja. Jos niitä tarkastuksien ja romutusten jälkeen jää asiakkaalle menevään materiaaliin, aiheutuu niistä vakavia ongelmia valmiissa tuotteissa.

Työn tarkoitus oli kartoittaa jähmettymisonkaloiden esiintyminen ja rakenne bloomivalulla sekä selvittää, mitkä eri prosessitekijät tai teräslaatuojen aiheuttamat tekijät vaikuttavat jähmettymisonkaloiden syntyyn. Jähmettymisonkaloiden syntymekanismien takia työssä oli olennaista tutkia valuprosessin liitos- ja lopetustoimia ja yrittää kehittää niihin parempia praktiikoita, jotta onkaloa saataisiin vähennettyä.

Jähmettymisonkalosta käytetään useimmin nimitystä pipe tai valuonkalo. Pipe on teollisuudessa ja kansainvälisissä tutkimuksissa parhaiten tunnettu nimitys tälle ilmiölle. Tästä syystä myös tässä työssä käytetään nimitystä pipe kuvaamaan jähmettymis- ja jäähtymiskutistumasta aiheutuvaa onkaloa. Pipen ollessa bloomien sisällä, loppupipestä sillalla eristettynä, sitä kutsutaan sekundääripipeksi tai keskustahuokoisuudeksi.

2 Jähmettymisteoria

2.1 Tilavuuden muutokset

Metallien atomit ovat jatkuvassa värähtelyliikkeessä, jonka suuruus riippuu muunmuassa metallin olomuodosta ja näin ollen siis lämpötilasta. Kiinteän metallin atomit ovat ympäröivien atomien muodostamien sidosvoimien aiheuttamassa tasapainotilassa kidehilassa, jossa atomit värähtelevät edestakaisin kiderakenteensa määräämässä paikassa. Mitä korkeampi metallin lämpötila on, sitä suurempi on myös atomien heilahtelun amplitudi, mistä johtuen atomit tarvitsevat enemmän tilaa. Tästä aiheutuu metallin tilavuuden laajeneminen lämpötilan kohotessa. /1/

Metallin sulaessa atomien väliset voimakkaat sidokset murtuvat ja kiderakenne hajoaa. Vaikka vierekkäisten atomien välillä vielä vaikuttaisikin sidosvoimia ja jonkinlainen lähirakennekin vallitsisi, voivat atomit liikkua suhteellisen vapaasti toisiinsa nähden. Atomien välinen keskietäisyys on sulassa pidempi kuin kiinteässä metallissa. Tästä johtuen myös metallin sulaminen lisää sen tilavuutta. /1/

Sulaneen metallin lämpötilaa edelleen nostettaessa lisääntyy atomien lämpöliike, mistä johtuen myös sulan teräksen tilavuus kasvaa. Voidaankin sanoa, että lähes aina metallin lämpötilaa nostettaessa tapahtuu tilavuuden kasvua. Tästä poikkeuksena mainittakoon puhtaan kiinteän raudan jäähtyessä tapahtuva faasimuutos α -ferriitin muuttuessa austeniitiksi noin 910°C:ssa, jonka yhteydessä tapahtuu noin 1 %:n tilavuuden väheneminen. /2/

Metallien valussa ja jähmettymisessä nämä ilmiöt tapahtuvat luonnollisesti käänteisesti, koska sulaa metallia valetaan haluttuun muotoon erilaisia jäähdytyksiä käyttäen. Tilavuuden muutoksista johtuen on selvää, että jähmettymisessä ja sulan tai kiinteän metallin jäähtyessä tapahtuu kutistumista. Pelkän jähmettymiskutistumisen voidaan arvioida hiilipitoisuudesta ja muusta seostuksesta riippuen olevan noin 2-6 %. /2/ Kokonaiskutistumaan valutapahtumassa lisätään vielä sulan metallin jäähtymiskutistuma. Vaikka jäähtymiskutistuma on vähäisempää kuin jähmettymiskutistuminen /2/, sen olennainen merkitys pipen muodostumisen

yhteydessä on vahvistettu tutkimuksissa /3,4,5/. Taulukossa 1 on esitetty sulan jäähtymis- ja jähmettymiskutistumat raudalla, teräksellä ja valuraudalla.

Taulukko 1. Jähmettymis- ja jäähtymiskutistuman arvoja

Laji	Sulan kutistumiskerroin	Jähmettymiskutistuma
Puhdas rauta /6/	0.02 % / °C	2.2 %
Teräs (hiili-% 0.3) /7/	0.009 % / °C	2.5-3 %
Valurauta /7/	0.017 % / °C	4 %

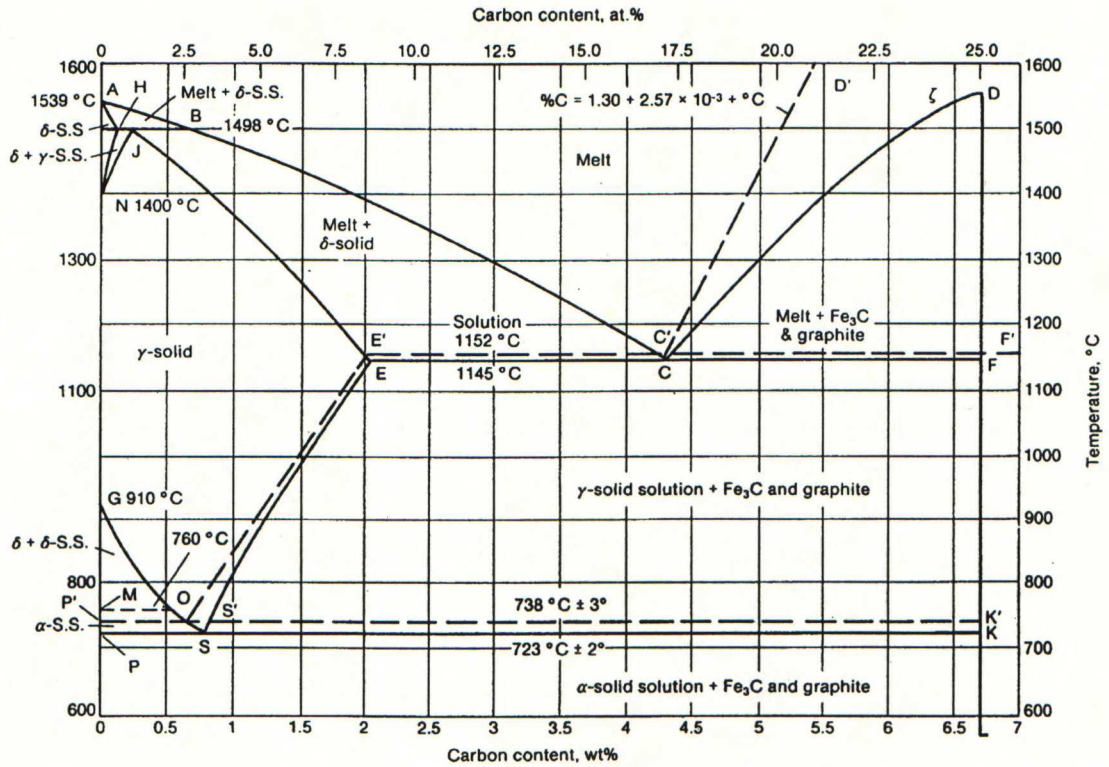
Kiinteän teräksen jäähtyessä soliduslämpötilasta huoneenlämpöön tapahtuu lisäksi noin seitsemän prosentin suuruinen jäähtymiskutistuma. Tämän kutistuman suuruuden määrää lähinnä seoksen hiilipitoisuus, muut seosaineet eivät tässä vaiheessa juuri vaikuta kutistuman suuruuteen. /7/

2.2 Raudan ja teräksen jähmettyminen

Puhdas rauta, kuten muutkin puhtaat metallit, jähmettyy sulamispisteessään eli noin 1534°C:ssa. Raudan tiheys kyseisessä sulamispisteessä on sulana 7036 kg/m³ ja kiinteänä faasina 7276 kg/m³. Kiinteän faasin tiheys huoneenlämpötilassa on puolestaan 7878 kg/m³. /1/ Näistä arvoista voidaan laskea jähmettymiskutistumalle arvoksi noin 3.3 %. Arvo poikkeaa taulukossa 1 esitetystä arvosta, koska puhdasta rautaa, jossa ei olisi yhtään hiiltä, on äärettömän vaikea valmistaa. Tämän lisäksi kutistumaa muodostuu myös raudan jäähtymisessä tapahtuvissa faasimuutoksissa, kuten δ-ferriitin muuttuessa austeniitiksi 1390°C:ssa, jolloin kutistuma on 0.6%:a. Raudan jäähtymisen jatkuessa austeniitti muuttuu α-ferriitiksi 910°C:ssa. Tällöin tapahtuu 1.03%:n tilavuuden laajeneminen. Nämä faasimuutokset tapahtuvat aina kyseisen muutoslämpötilan ohituksen yhteydessä. On kuitenkin huomattava että lämpötilaa nostettaessa ja laskettaessa saadaan faasimuutoslämpötiloille erisuuruisia arvoja. Nämä arvot poikkevat toisistaan sitä enemmän mitä suuremmalla nopeudella lämpötila muuttuu. Syynä on faasimuutoksiin liittyvä määrätty hitaus. /2/

Puhdasta rautaa ei juurikaan valeta, vaan rautaan lisätään seosaineiksi hiiltä ja muita seosaineita. Mikäli hiilipitoisuus on alle 1.7 %:a puhutaan teräksistä ja yli 1.7 %:set seokset tunnetaan valurautoina. /8/ Suurin ero näiden kahden ryhmän välillä on valutuotteen muovattavuus. Teräokset ovat yleensä muokattavissa haluttuun muotoon, kun valetut valurautakappaleet ovat yleensä halutussa loppumuodossa. Terästen parempi muokattavuus johtuu valurautoja pienemmästä hiilen määrästä sekä seosaineista. Tärkeimmät seosaineet teräksissä ovat hiilen lisäksi mangaani, pii, kromi, nikkeli sekä alumiini. Muita seosaineita ovat mm. molybdeeni, vanadiini, volframi, koboltti, kupari ja boori. Näiden lisäksi teräksissä esiintyy jonkin verran rikkiä ja fosforia, jotka käsitetään yleensä epäpuhtauksina. Tosin rikkiä voidaan myös seostaa pieniä määriä teräksen lastuttavuuden parantamiseksi.

Teräksen jähmettymisessä suurin ero puhtaan raudan jähmettymiseen on että teräs, kuten muutkin metalliseokset, jähmettyy laajemmalla lämpötila-alueella. Teräksen jähmettyminen alkaa likviduslämpötilassa, jossa ensimmäiset kiteet ydintyvät. Kiteet alkavat kasvaa ja sulaa teräs jatkaa jähmettymistään. Kaiken sulan ollessa jähmettyneenä kiinteäksi teräkseksi on saavutettu soliduslämpötila. Teräslaaduilla on kullakin omat solidus- ja liquiduslämpötilansa, jotka riippuvat lähinnä seosaineiden määristä ja erityisesti hiilen määrästä. /7/ Lämpötila-aluetta, joka on solidus- ja likviduslämpötilojen välissä kutsutaan puuroalueeksi. Puuroalueella on siis osa teräksestä jähmettyneenä ja osa sulana. Teräksen jähmettymistä on havainnollisinta kuvata Fe-C-tasapainopiirroksella, joka on esitetty kuvassa 1. Tasapainopiirroksista nähdään myös eri faasien esiintymiset eri hiilipitoisuuksilla. Kuva 1 esittää tasapainon mukaisen jähmettymisen ja faasimuutokset. Todellisessa valutilanteessa esim. jatkuvavalussa jähmettymiseen ja faasimuutoksiin vaikuttavat jähmettymis- ja jäähtymisnopeudet. Tämän seurauksena solidus ja faasimuutokset siirtyvät tasapainopiirroksen verrattuna matalampiin lämpötiloihin.



Kuva 1. Fe-C-tasapainopiirros /6/

3 Pipe ja siihen vaikuttavat tekijät

3.1 Termeistä

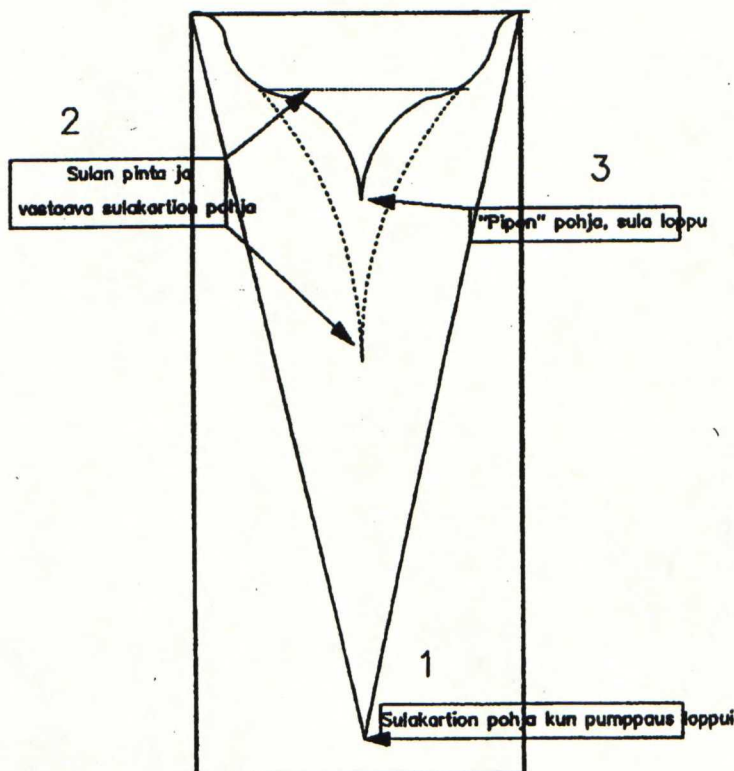
Pipellä tarkoitetaan jatkuvavalussa pääasiallisesti valusarjan lopetuksen tai liitoksen yhteydessä muodostuvaa jähmettymisonkaloa eli loppupipeä. Myös muotti- ja valannevaluissa tapahtuu samanlaista pipemuodostusta. Tästä teräksen kutistumisesta aiheutuvasta ilmiöstä voidaan käyttää myös nimitystä valuonkalo /9/ tai kutistumaonkalo. Käytettävän termin valintaa vaikeuttaa se, että aiheesta ei ole juuri kirjoitettu muita suomenkielisiä artikkeleita kuin terästehtaiden sisäisiä selvityksiä. Englanninkielisissä artikkeleissa käytetään yleisimmin termejä pipe tai shrinkage cavity. Kaikkein yleisimmin käytetty ja kansainvälisesti parhaiten tunnettu nimitys teollisuudessa ja tutkimuksissa on pipe ja sitä on myös tässä työssä käytetään.

Pipen ollessa kokonaan suljettuna bloomin sisällä sitä kutsutaan useimmin sekundääripipeksi, keskustahuokoseksi/keskustahuokoisuudeksi (engl. central porosity, saksal. Kernporosität) tai kutistumahuokoseksi. Sekundääripipet ovat bloomin päädyistä alkavasta pipestä voimakkaan pylväskidejähmettymisen aiheuttamilla silloilla erotettuina. Niitä muodostuu sulan virtauksen ollessa estyneenä sulakartion päähän. Sekundääripipe-nimitystä käytetään useimmin silloin, kun huokoisuus on lähellä varsinaista lopetuspipeä. Keskustahuokoisuutta voi toki syntyä myös muualle bloomin vaikka koko valun ajan. Nämä huokokset voivat olla joko pieniä, pyöreitä ja sileäreunaisia tai vähän suurempia ja pinnoiltaan rosoisempia. /8/

Vety voi myös aiheuttaa bloomin sisälle myös pallomaisia huokosia, jotka pipeistä poiketen pyrkivät poistumaan bloomista kohti sen pintaa. Samalla ne aiheuttavat bloomin pintaan neulanpiston näköisiä reikiä. Myös valuputkeen syötetty suojakaasuna toimiva argon aiheuttaa kaasuhuokosia. Happi ja typpi puolestaan pyrkivät sitoutumaan muihin alkuaineisiin ja muodostamaan kiinteitä yhdisteitä. Huomattavin ero kaasujen aiheuttamilla kaasuhuokosilla ja pienillä keskustahuokosilla on se, että jälkimmäisten sisällä ei ole kaasuja. /8/

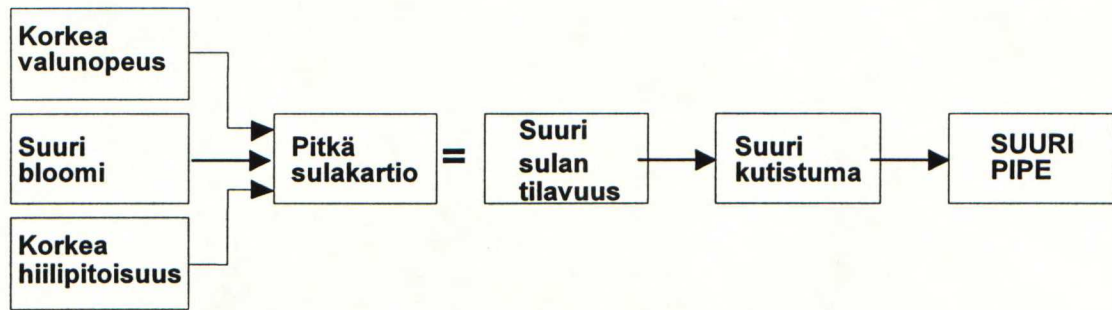
3.2 Pípen muodostuminen

Pípe syntyy valun lopetuksen tai sellaisen sulatusten välisen liitoksen yhteydessä, jossa valukoneella valetaan väliallas tyhjäksi ja valettava bloomi pysäytetään. Tilanne muistuttaa tällöin pitkälti muottivalua, koska uutta sulaa ei enää syötetä kokilliin, vaan kokillin ja toisiojäähdytysalueen rullaston osittain tukema, jo jähmettynyt bloomín kuori muodostavat eräänlaisen muotin, jossa teräs jähmettyy. Kun tätä bloomia edelleen jäähdytetään samalla tavalla kuin valun aikaisemmassakin vaiheessa, aiheuttavat sulan jäähtyminen, sulan faasimuutos kiinteään ja kiinteän jäähtyminen bloomiin kutistuman. Näiden kutistumien arvoja esitettiin taulukossa 1. Tämän kutistuman takia bloomín keskelle muodostuu kartiomainen onkalo, jota siis kutsutaan pípeksi. Valun ollessa käynnissä tähän pípeen virtaa jatkuvasti uutta sulaa, mutta lopetus- ja liitostilanteissa tätä uutta sulaa ei tule ja tuloksena on siis pípe. Kuvassa 2 on esitetty pípen muodostuminen jatkuvavalussa.



Kuva 2. Pípen muodostuminen jatkuvavalussa /9/

Kuvassa kohdassa 2 on esitetty katkoviivalla sulan sijainti valun aikana. Kohdassa 3 on kuvattu sulan loppumisen jälkeen jähmettymiskutistuman takia muodostunut pipe. Pípen muodostuminen ja sen suuruus riippuu useista tekijöistä. Näitä tekijöitä on esitetty seuraavissa kappaleissa tarkemmin. Yleisesti kuitenkin on hyväksytty kuvassa 3 esitetty päätelmäketju pípen muodostumisen suuruudelle.

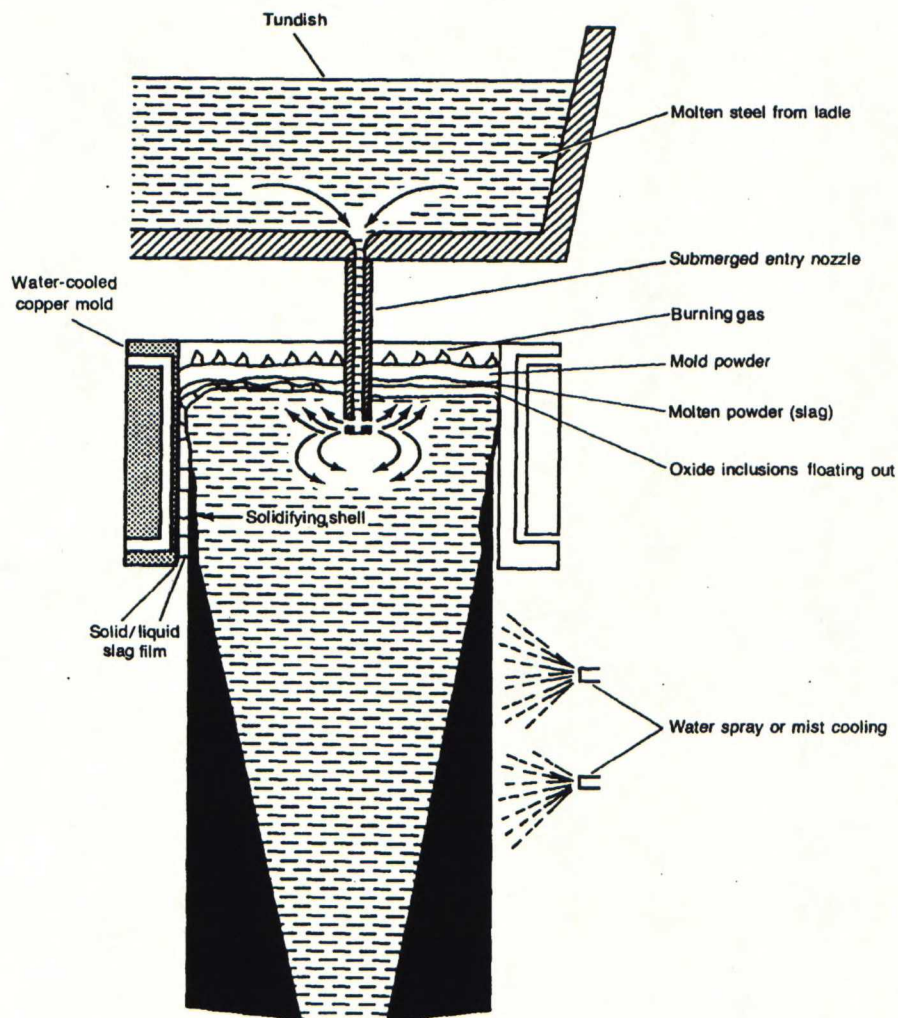


Kuva 3. Pípen suuruuden määráytyminen

Sekundááripípen esiintyminen bloomien sisällä on monesti herättänyt ihmetystä, sillä monasti niiden esiintymiselle ei ole tunnu löytyvän mitään loogista selitystä. Esimerkiksi loppupípen jälkeen saattaa olla keskustaltaan erittäin hyvälaatuista terästä metrin verran ja sen jälkeen taas sekundááripípe jatkuu. Tacke tutki näitä pípe-esiintymiä ja erityisesti niiden sijainnin säännönmukaisuuksia ja epäsäännöllisyyksiä teelmissä, ensin tilastollisin /10/ ja sen jälkeen matemaattisin menetelmin. /11/ Tacke kuvaa työnsä alussa pípejä omituiseksi tyhjien tilojen ketjuiksi, joiden muodot, tilavuudet, pituudet ja pípen välisten siltojen pituudet vaihtelevat epäsäännöllisellä tavalla. Tilastollisen analyysin jälkeen Tacke toteaa erittäin monimutkaisten muuttujien vaikuttavan sekundááripípejen esiintymiseen. Tämän vuoksi hän jatkoi tutkimuksia tehden erilaisia matemaattisia simulaatioita pípen pituuksille, niiden esiintymistiheydelle ja siltojen pituuksille. Simuloiduilla malleilla saatiin jotain tuloksia, mutta mitään yleispätevää vastausta tutkittuihin aiheisiin ei löytynyt. Lopuksi Tacke mainitsee sekundááripípen muodostumisen olevan sisäisesti syntyvä spontaani tapahtuma, jota ei pystytä määrittelemään juuri millään muulla tavalla kuin kaaosteorialla.

3.3 Jäähdytys

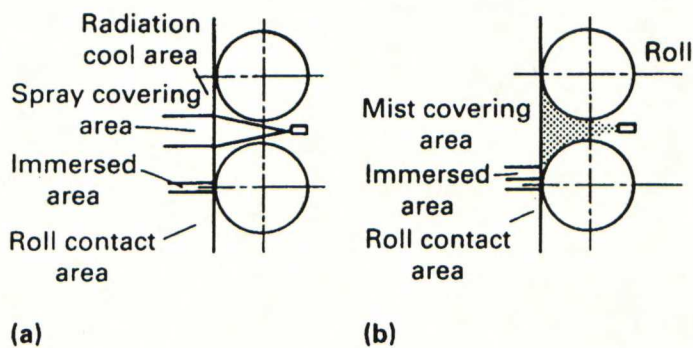
Teräksen jatkuvavalussa sula teräs virtaa välialtaasta kokilliin keraamisen valuputken läpi. Teelmävalukoneissa käytetään myös avoimia valusuihkuja, jotka voivat olla suojahupuin tai -laatikoin varustettuja. Kokillissa sula alkaa jähmettyä joutuessaan kontaktiin vesijäähdytteisen kuparikokilliseinän kanssa. Kuva 4 havainnollistaa kokillissa tapahtuvan jähmettymisen sekä antaa yleiskuvan valutapahtumasta välialtaassa ja kokillissa. Kuva on levyaihiovalukoneesta, joten kokilli on huomattavasti leveämpi kuin bloomivalukoneessa, mutta valutapahtuma on muuten sama.



Kuva 4. Väliallas ja kokilli /6/

Jähmettyvää kuorta vedetään tasaisella nopeudella eli valunopeudella ulos kokillista. Tämän vuoksi sula teräs täytyy jähmettää kokillissa niin tehokkaasti, että bloomien pintaan ehtii kasvaa riittävän paksu kuori, joka kestää siihen kohdistuvan sulan ferrostaattisen paineen. Mikäli kuori ei kestä sulan teräksen painoa, jähmettynyt kuori puhkeaa, tapahtuu läpijuoksu ja sula teräs virtaa ulos bloomista.

Kokillin alapuolella sekundaarijähdytysvyöhykkeellä bloomien jäähdytystä jatketaan tukirullilla sekä vesi-paineilmasuihkulla, jotka voidaan havaita kuvasta 4. Levyaihiovalukoneissa käytetään jäähdytettyjä tukirullia. Teelmä- ja bloomivalukoneiden tukirullissa ei yleensä itsessään ole jäähdytystä, vaan rullia ja erityisesti niiden välistä aluetta jäähdytetään vesisuihkulla, jotka myös jäähdyttävät tukirullia. Monesti suihkutetaan veden ja paineilman seosta, jotta saataisiin tehokkaampi ja tasaisempi jäähdytys. Toinen suuri etu on jäähdytysveden määrän pienempi tarve. Kuva 5 esittää havainnollisesti edellämainittujen jäähdytysmenetelmien toiminnan. Lisäksi kuvasta nähdään kostutettujen pintojen laajuudet tukirullien läheisyydessä.



Kuva 5. Toisiojähdytysmenetelmät a) vesi b) vesi-paineilma /6/

Jäähdytyksen tehtävä on varmistaa bloomien jähmettyminen siirtämällä jähmetymisessä syntyvä lämpö ΔH pois sulasta. Myös sulan todellisen lämpötilan ja likviduslämpötilan erotus eli yllilämpö on poistettava jähmettyvästä bloomista. Jähmetymisessä vapautuva lämpö on kaikkein suurin bloomista pois siirrettävä lämpö, muiden lämpöjen ollessa kertaluokkaa pienempiä.

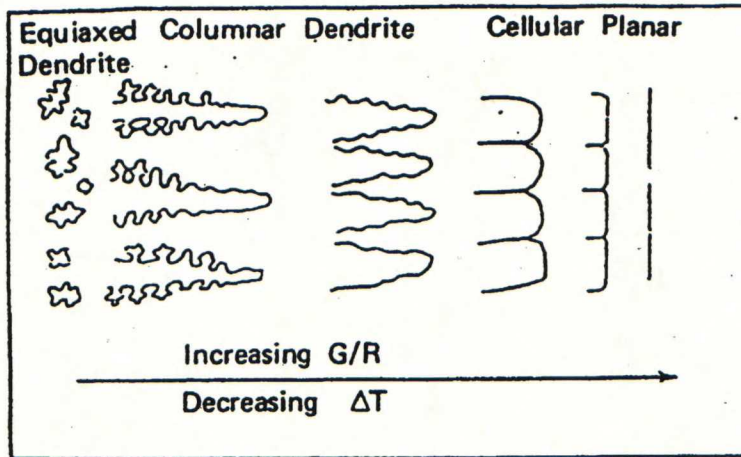
Teräksen jäähtymisaste bloomien eri osissa vaikuttaa muodostuvan pipen suuruuteen. Jäähtymisasteella tarkoitetaan sitä kuinka voimakkaasti lämpötila putoaa kyseisessä kohdassa. Jähmettymisen alkuvaiheessa jäähtymisaste on yleensä aina suurempi pinnalla kuin keskustassa. /12/ Ongelmaksi muodostuvatkin jähmettymisen loppuhetket, keskustan kiinteän osuuden ollessa suurempi kuin 0.5, jolloin lämpökutistuminen vaikuttaa muita valuvaiheita voimakkaammin. /5/ Tällöin bloomien keskustassa tapahtuu voimakkaampaa jäähtymistä kuin bloomien pinnalla ja myös pipen muodostuminen on pahempaa. Mikäli jäähtymisaste jähmettymisen loppuvaiheessa saataisiin pidettyä bloomien pinnalla ja keskustassa yhtäsuurina, saataisiin pipen muodostumista vähennettyä. /13/ Tätä periaatetta käytetään hyväksi termisessä softreduktiossa, joka esitellään muiden pipen vähentämiskeinojen yhteydessä kappaleessa 4.

3.4 Jähmettymisrakenteet jatkuvavalussa

Jähmettyminen jatkuvavalussa alkaa kiteiden ydintymisellä. Kiteet alkavat kasvaa ja kasvavat niin kauan, kunnes sulaa ei enää ole jäljellä. Ydintymispaikkoina toimivat kokillin seinämät ja sulassa olevat epäpuhtaudet, kuten sulkeumat, keraamiset ja muunlaiset hiukkaset. Kuutiosenttimetrissä sulaa terästä on todettu olevan 10^7 - 10^8 näitä epäpuhtaushiukkasia, jotka toimivat kiteiden ydintymispaikkoina. /14/

Ydintyneet kiteet alkavat muodostumisensa jälkeen kasvaa. Kiteiden pinnalta vapautuu sulan jähmettymisessä muodostuvaa lämpöä, joka täytyy poistaa jähmettymisrintamasta. Lämpö siirtyy joko kiteen läpi kokillin seinämään, jolloin seuraa joko dendriittinen, sellimäinen tai tasomainen jähmettyminen tai lämpö siirtyy kidettä ympäröivään sulatteeseen, jolloin jähmettyminen on tasa-akσιαalista. Tästä johtuen tasa-akσιαalisten kiteiden ydintyminen edellyttää riittävän alhaista sulan yllilämpöä, koska liian suuri ympäröivän sulan lämpö ei voi enää ottaa vastaan lisää lämpöä, vaan tällöin kide sulaa. /15/ Muita kiderintaman muotoa määrääviä tekijöitä sulan lämpögradientin lisäksi ovat sulan jähmettymisnopeus ja koostumus sekä jähmettyneen kuoren etenemisnopeus. /2/

Teräksen jatkuvavalussa jähmettyminen tapahtuu pylväskidemäisenä tai tasa-aksiaalisena. Puhtaiden metallien jähmettyminen tapahtuu puolestaan normaalisti tasomaisena, jolloin jähmettymisrintama on aivan tasainen. Kasvupinta voi olla sellimäinenkin, millä tarkoitetaan tasomaisen ja pylväskidemäisen kasvun välimuotoa. Kuvasta 6 nähdään paremmin edellämainittujen jähmettymisrakenteiden hahmotellut muodot sekä niiden muodostumiseen vaikuttavat tekijät.



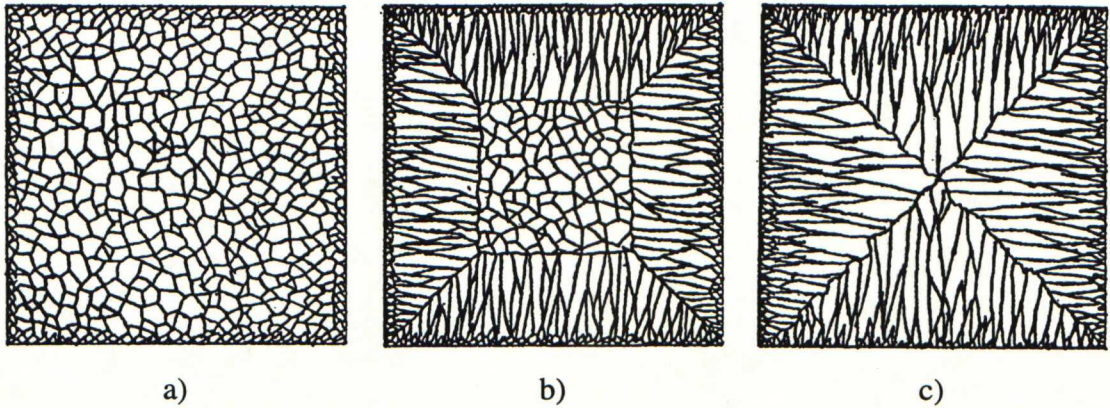
Kuva 6. Kiteenkasvun muotoon vaikuttavia tekijöitä

Teräksen jatkuvavalussa jähmettyminen alkaa kokillin seinästä, missä jäähtyminen on tehokkaasta lämmönsiirrosta johtuen voimakkainta. Jähmettynyt rintama jatkaa pylväskidemäistä kasvuaan kohti bloomien keskustaa. Siellä kiteet joko kasvavat yhteen, jolloin keskustahuokosten muodostuminen on mahdollista tai sulan ollessa riittävän alijäähtynyttä keskelle muodostuu tasa-aksiaalisten kiteiden vyöhyke. Tasa-aksiaalisia kiteitä voi muodostua myös voimakkaiden sulavirtausten aiheuttamasta pylväskiteiden kärkien katkeilusta./15/

Jatkuvavaletusta bloomista on yleensä erotettavissa kolme erilaista jähmettymisvyöhykettä:

1. Bloomin pinnassa hieno, tasa-aksiaalinen kiderakenne
2. Pinnan sisäpuolelta alkava pylväskidemäinen kiderakenne
3. Keskustassa tasa-aksiaalinen kiderakenne

Jähmettymisrakenne alkaa aina tasa-akσιαalisella kiderakenteella, jonka jälkeen jähmettyvän pylväskidevyöhykkeen ja keskustaan mahdollisesti muodostuvan tasa-akσιαalisen vyöhykkeen laajuudet määräytyvät lähinnä yllilämmön ja teräksen koostumuksen mukaan. Jähmettymisrakenteiden yleisimpiä vaihtoehtoja on esitetty havainnollisesti kuvassa 7, jossa on hahmotelmia erilaisten jatkuvavaluaihioiden poikkileikkauksissa. Kuvassa esitetyt poikkileikkaukset ovat skemaattisia kuvia.



Kuva 7. Erilaisia jähmettymisrakennevaihtoehtoja /2/

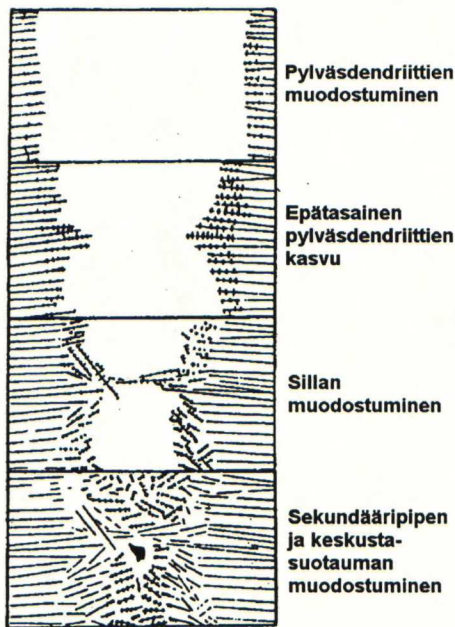
Kuvassa 7a esitetyssä aihiossa nähdään kuinka pinnalle jähmettyneen tasa-akσιαalisen vyöhykkeen jälkeen koko aihio on yhtä tasa-akσιαalisten kiteiden vyöhykettä. Tällainen rakenne voitaisiin saada, jos valussa on erittäin matala yllilämpö, voimakas sähkömagneettisen sekoittimen käyttö kokillissa ja mahdollisesti ympärysaineiden avulla. Sähkömagneettinen sekoitin aiheuttaa sulaan voimakkaita virtauksia, jotka estävät dendriittien kasvut katkomalla niiden kärkiä ja tehostamalla yllilämmön poistumista. Yllilämmön poistumisen tehostaminen on itseasiassa tärkeämpi tekijä kuin dendriittien kärkien katkominen.

Kuvassa 7b on esitetty tyypillinen jatkuvavalussa syntyvä jähmettymisrakenne, jossa pylväsdendriittien kasvu on loppunut ennen aihion keskustaa ja keskustaan on muodostunut tasa-akσιαalisten kiteiden muodostama vyöhyke. Tällaisessa valutapahtumassa sulan yllilämpö on normaali ja pipen muodostuminen pitäisi olla vähäistä keskustan hyvän sulavirtauksen ansiosta.

Kuvassa 7c jähmettyminen on alkanut tasa-akσιαalisesti aihion pinnalla, jatkuen sitten pylväskidemäisesti aihion keskustaasti. Tällaista rakennetta suosivat korkea sulan yllilämpö ja pienet aihion dimensiot, joiden takia pylväsmäisten dendriittien on mahdollista kasvaneet keskustaasti. Tällainen rakenne on altis muodostamaan siltoja ja sekundääripipettä.

3.5 Siltojen muodostuminen

Kokillijähdytyksen jälkeisen bloomien jähdytyksen tulisi olla mahdollisimman tasaista ja vielä tasaisesti vähenevää meniskuksesta poispäin siirryttäessä, koska tarvittava jähdytystehokin vähenee kuoren paksuuden kasvaessa. Mikäli bloomien jähdytys on teholtään huomattavan epätasaista bloomien eri kohdissa, on vaarana että voimakkaasti jähmettyvät pylväskiteet kasvavat liian nopeasti ja muodostavat siltoja. /16/ Tällöin bloomi siis kasvaa jostain kohtaa keskeltä umpeen. Nämä sillat katkaisevat sulan virtauksen eteenpäin ja estävät näin korvaavan sulan pääsyn täyttämään kutistunutta tilaa. Kuva 8 esittää edellämäinitun siltarakenteen muodostumisen ja samassa yhteydessä esiintyvän seosaineiden suotautumisen syntymisen.

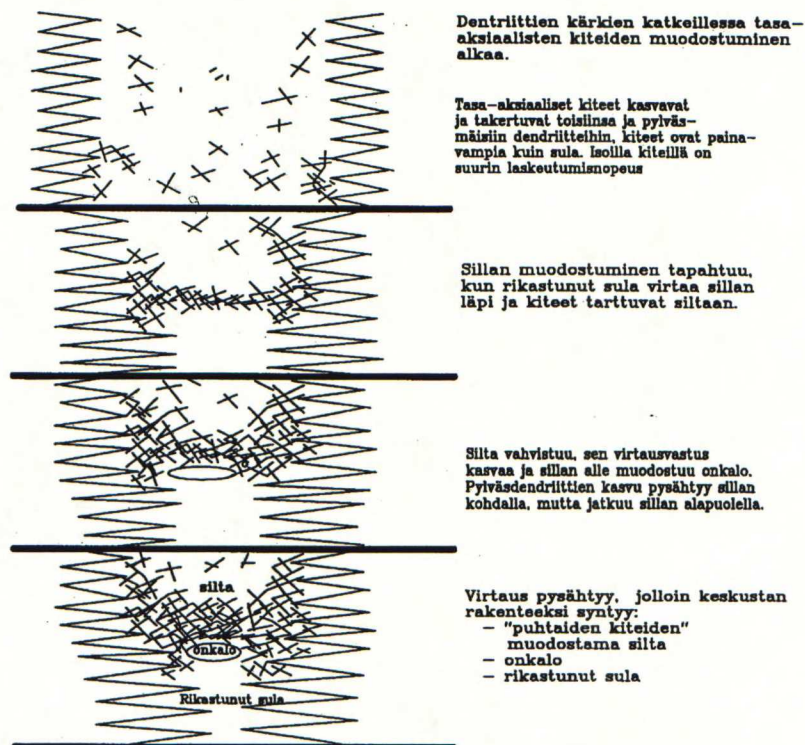


Kuva 8. Siltarakenne ja sekundääripipen muodostuminen /16/

Siltojen muodostumisen vähentämiseksi jäähdytyksen voimakkuus tulisi määritellä erityisen tarkasti niissä tilanteissa, joissa valunopeus pudotetaan hetkellisesti noltaan. Tällaisia tilanteita ovat valun lopetus ja liitokset. Näissä on usein suuri riski jäähdyttää paikallaan olevaa bloomia liian tehokkaasti.

On kuitenkin huomattava, että oli bloomien jäähdytys kuinka tasaista tahansa, eikä pahoja siltoja pääsisikään muodostumaan, voidaan silti olettaa että bloomien keskustaan muodostuu aina pientä huokoisuutta. /17/ Samoin on huomattava että siltoja muodostuu, vaikka jäähdytysprofiilissa ei olisikaan mitään epätasaisuuksia, koska dendriitit kasvavat aina jonkin verran epätasaisesti. Ison puuroalueen tiedetään yleisesti lisäävän siltariskiä, joten eri teräslaadut ovat siltaherkkydeltään erilaisia.

Fundian Wire Oy:n terästehtaalla Koverharissa on siltojen muodostumisen teoriaa kehitetty edelleen. Teorian mukaan siltoja voi muodostua tasa-aksiaalisten kiteiden tarttuessa kasvavien pylväsmäisten dendriittikiteiden kärkiin jähmettymisrintamassa teelmän keskellä. /18/ Tämän perusteella sillat ja suurimmat sekundääripipet voitaisiin eliminoida estämällä tasa-aksiaalisten kiteiden muodostuminen jähmettymisen loppuvaiheessa. Pylväskiteet voisivat tällöin kasvaa teelmän keskustaan asti, kuten kuvassa 7c esitettiin. Teoriassa oletetaan pylväskiteiden kasvavan suhteellisen tasaisena rintamana. Kuvassa 9 on esitetty tämän teorian mukainen siltojen muodostuminen.



Kuva 9. Koverharin teorian mukainen siltojen muodostuminen /18/

Uuden teorian mukaisesti syntyvät sillat ovat samanmuotoisia ja ne toistuvat rakenteessa. Siltojen toistuvuudesta säännöllisin väliajoin ei ole varmuutta, mutta niiden rakenne on aina sama. Silta muodostuu puhtaista kiteistä, joiden keskelle jähmettyy rikastunutta sulaa. Sillan alapuolelle jää tällöin isoja huokosia, sekundääripipejä.

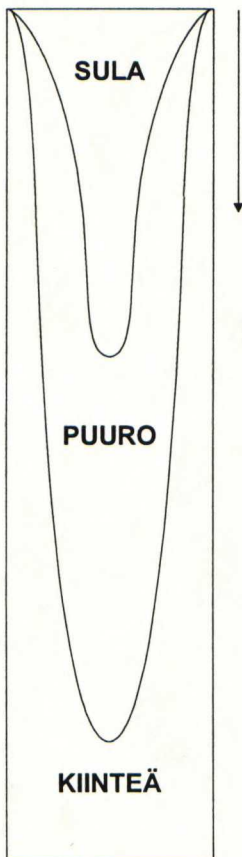
3.6 Teräksen analyysi ja puuroalue

Yleisesti tiedetään hyvin, että korkea hiilipitoisuus lisää huonon sisärakenteen muodostumisriskiä jatkuvavalussa. Erityisen voimakasta on hiilen keskustasuotauma, joka aiheuttaa vakavia laatuongelmia. /19/ Suuren hiilipitoisuuden on todettu myös lisäävän pipen muodostumista. /20/

Hiilipitoisuudella on vaikutusta myös pipen muodostumisen muotoon. Korkeahiilisillä teräslaaduilla pipe on halkaisijaltaan suurempi ja yhtenäisempi.

Matala- ja keskihiilisillä laaduilla puolestaan esiintyy enemmän hajanaista keskustahuokoisuutta ja kapeaa putkimaista pipeä, joista molemmilla pipetyypeillä on suuri todennäköisyys mennä umpeen valssauksessa. Kappaleen 3.7 kuvassa 14 nähdään Morin et al /25/ tekemä keskustahuokoisuuden luokittelu eri ryhmiin ja näiden ryhmien mukainen huokoisuuden esiintyminen Morin tekemissä kokeissa. Kuvassa on esitetty erikokoisten teelmien ja bloomien koetuloksia korkeahiilisille (0.6-0.84%), matalahiilisille (0.1-0.2%) ja keskihiilisille teräslaaduille.

Kuten aikaisemmin jo mainittiin, teräksen jähmettymisessä sulan ja kiinteän teräksen välillä ei ole tarkkaa rajaa, vaan sulan ja kiinteän faasin välillä on kahden faasin alue, puuroalue, jossa jähmettyneiden pääasiassa pylväsmäisten kiteiden välissä on jäännössula. ”Puurosta” sanan varsinaisessa merkityksessä voidaan puhua vain tasa-aksiaalisen jähmettymisen yhteydessä. Puuroalue sekä muut jähmettymisvyöhykkeet on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Teräksen jatkuvavalun jähmettymisvyöhykkeet

Puuroalueen pituus valun aikana riippuu käytetystä valunopeudesta, ylälämpötilasta, toisiojäähdytyksestä, bloomien paksuudesta ja kemiallisesta koostumuksesta. Hiilen määrän on yleisesti tiedetty olevan merkittävä tekijä, mutta myös rikin määrällä on todettu olevan merkitystä. /21/ Eri seosaineiden vaikutukselle likviduslämpötilaan on usein terästehtailla omat omiin teräslajeihinsa sopivat kaavat. Seuraavassa erimerkkinä Imatran Steelillä käytettävät kaavat:

$$T_{liq} = 1540 - \left(\frac{K_1 \cdot C + 8 \cdot Si + 5 \cdot Mn + 25 \cdot S}{+ 1.5 \cdot Cr + 4 \cdot Ni + 2 \cdot Mo + 5 \cdot Cu} \right), \text{ kun } 0 < C < 0.5 \quad (1)$$

$$T_{liq} = 1540 - \left(\frac{K_1 \cdot 0.5 + K_2 \cdot C + 8 \cdot Si + 5 \cdot Mn + 25 \cdot S}{+ 1.5 \cdot Cr + 4 \cdot Ni + 2 \cdot Mo + 5 \cdot Cu} \right), \text{ kun } C > 0.5 \quad (2)$$

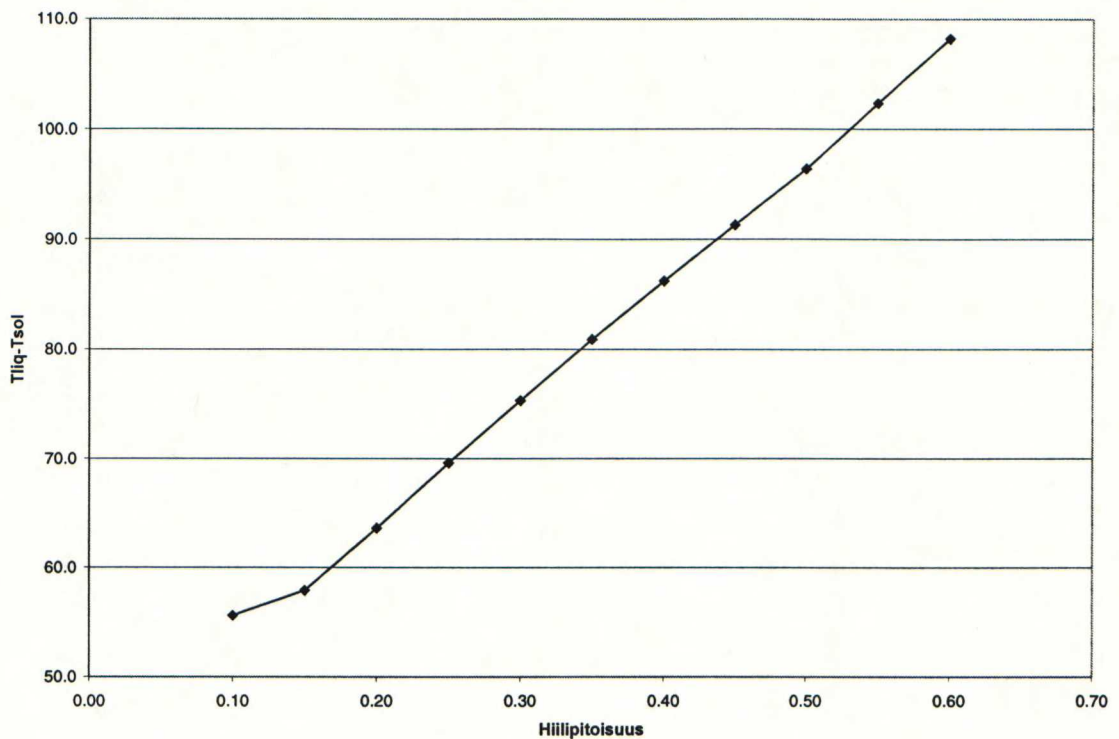
, joissa $K_1 = 88$ ja $K_2 = 76$.

Kaavoista voidaan nähdä hiilen ja myös rikin määrien muita seosaineita suurempi kerroin. Myös muissa tutkimuksissa esiintyneissä kaavoissa likviduslämpötiloille on rikillä nähty korkeita kertoimia. Näistä esimerkkinä Morin et al /25/ kaava:

$$T_{liq} = 1538 - \left(\frac{f[\%C] + 13.0[\%Si] + 4.8[\%Mn] + 1.5[\%Cr]}{+ 4.3[\%Ni] + 30[\%S] + 30[\%P]} \right) \quad (3)$$

, jossa $C < 0.50\% : f[\%C] = 55[\%C] + 80[\%C]^2$
 $0.5 < C < 1.0 : f[\%C] = 44 - 21[\%C] + 52[\%C]^2$

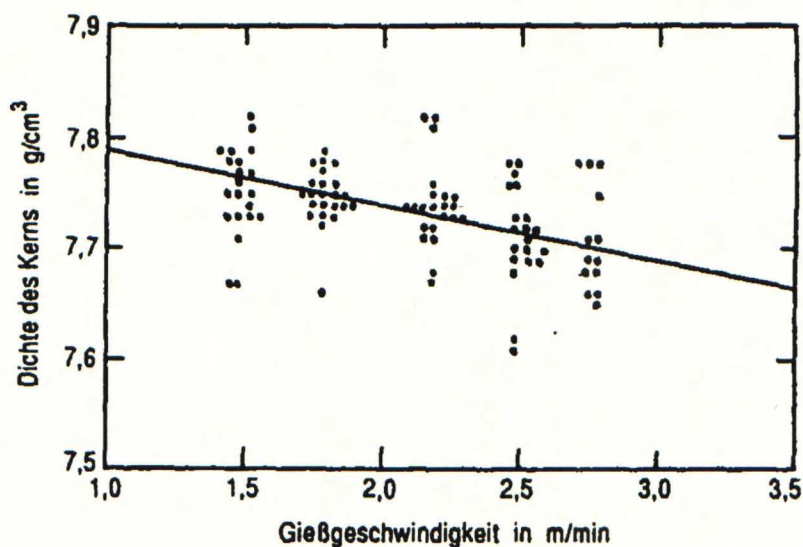
Kuvassa 11 on esitetty teräksen hiilipitoisuuden ja likvidus- ja soliduslämpötilojen erotuksen eli puuroalueen pituuden korrelointi. Lämpötilojen erotus on mallinnettu teräslaatuojen jäähmettymistä simuloivalla ohjelmalla, IDS:llä. /22/ Teräksen muiden seosaineiden määrät ovat vakioita: Si=0.3%, Mn=1.0%, S=0.04%, P=0.03% ja Al=0.015%.



Kuva 11. Terästen hiilipitoisuuden ja puuroalueen laajuuden vastaavuus

3.7 Valunopeus ja valulämpötila

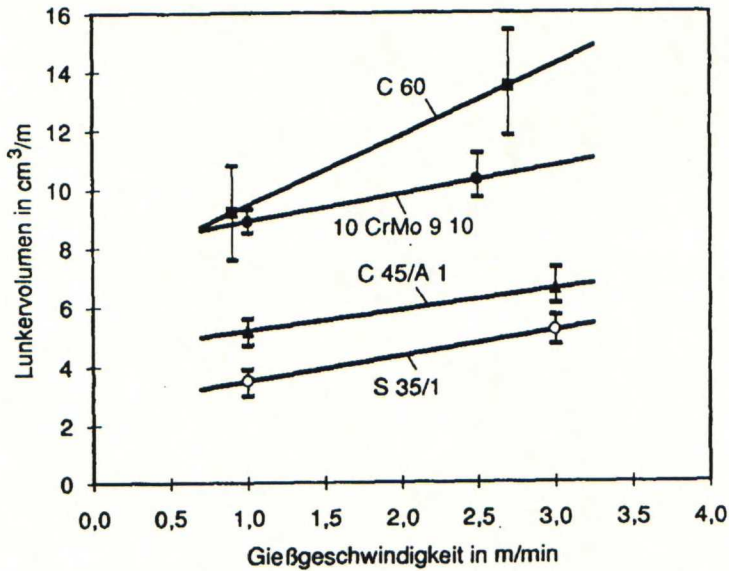
Yleisesti tiedetään sulakartion pituuden riippuvan käytetystä valunopeudesta. Samoin tiedetään sulakartion pitenemisen lisäävän pipen tilavuutta, koska sulaa on enemmän jähmettymässä ja täten jähmettymiskutistuma on suurempi. /3/ Näiden tietojen perusteella voidaan sanoa valun lopussa muodostuvan pipen olevan suurempi korkeilla valunopeuksilla. Valunopeuden vaikutuksesta sekundääripipen muodostumiseen on puolestaan löytynyt hieman vaihtelevia tuloksia. Yleensä mainitaan suuren valunopeuden aiheuttavan eittämättä voimakasta keskustahuokoisuutta. Grönsfeld et al ovat saaneet tutkimuksessaan /23/ tuloksia, joiden mukaan valunopeus vaikuttaa myös sekundääripipen määrään. Kuvassa 12 nähdään heidän saamansa verrantokuva valunopeuden ja aihion keskustan tiheydelle halkaisijaltaan 175 mm olevalle tangolle. Kuvasta voidaan havaita, kuinka keskimääräinen keskustan tiheys vähenee valunopeuden kasvaessa eli toisin sanoen huokoisuus lisääntyy valunopeuden kasvaessa.



Kuva 12. Aihion keskustan tiheyden riippuvuus valunopeudesta /23/

Wünnenberg ja Jacobi ovat puolestaan tulleet tutkimuksessaan siihen lopputulokseen, että valunopeuden vaikutus sekundääripipen muodostumiseen ei olekaan kovin selvästi havaittavissa. /24/ Heidän tuloksensa tosin viittaa lähinnä valun aikana muodostuviin huokosiin.

Valun lopussa käytetyn valunopeuden on todettu vaikuttavan sulakartion pituuteen siten, että valunopeuden ja lopussa muodostuvan pipen suuruuden välillä on olemassa suora riippuvuus. /9/ Tätä tulosta vahvistavat useat tutkimukset. Esimerkiksi Wiemer et al /4/ ovat myös tutkimuksessaan päätyneet tulokseen, jonka mukaan valunopeus vaikuttaa pipen tilavuuteen. Tästä tutkimuksesta on esitetty riippuvuuskuvaaja kuvassa 13.



Kuva 13. Valunopeuden vaikutus pipen tilavuuteen /4/

Valunopeuden ollessa suuri on erityisesti pienisäteisillä kaarevilla valukoneilla vaarana sulan ns. back flow. /3/ Siinä sulakartion kärki on edennyt aihion oikaisukohtaan asti, jolloin on vaarana, että sula alkaa virrata jähmettyvästä kärjestä kohti meniskusta. Raihle havaitsi sen kehittäessään yhtälöä pipen suuruuden määrittämiseksi teelmävalussa. Back flow pidensi pipeä erityisesti kokeessa, jossa valettiin vakiovalunopeudella valun loppuun asti. Yhtälö pipen muodostumisen määrittämiseksi teelmille differentiaalimuodossa /3/:

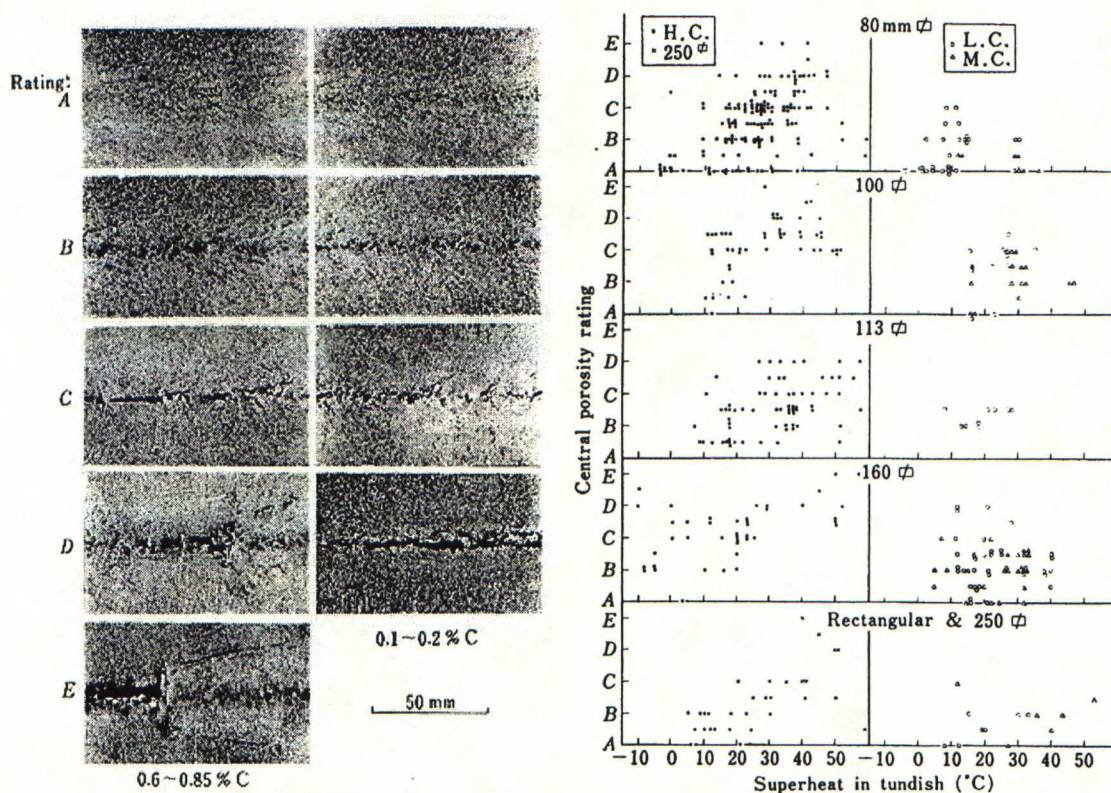
$$\frac{dh}{dt} A = \frac{dV_s}{dt} \beta + \frac{dV_c}{dt} \quad (4)$$

- , jossa
- dhA = pipen tilavuus [m^3]
 - dV_s = jähmettyneen sulan tilavuuden muutos [m^3]
 - β = jähmettymiskutistuma [-]
 - dV_c = jäähtymiskutistuman tilavuuden muutos [m^3]
 - dt = ajan muutos [s]

On hyvä muistaa että käytettävä valunopeus saattaa määräytyä välialtaan lämpötilan mukaan. Esimerkiksi Imatralla näin tapahtuu useimmilla laaduilla. Tällöin

valulämpötila on optimoitu kullekin laadulle parhaaksi mahdolliseksi ja sitä pyritään pitämään yllä. Valunopeuden nostaminen lisää luonnollisesti sulan vaihtuvuutta välialtaassa ja täten lämpötila, jos nyt ei nouse, niin ainakin tilanteen mukaan pysyy ennallaan tai ainakin lämpötilan putoaminen sulassa hidastuu. Valunopeuden pudottaminen vastaavasti vähentää välialtaan sulan lämpötilaa, sulan hitaamman vaihtuvuuden vuoksi.

Mori et al /25/ kertovat korkeamman valulämpötilan vaikuttavan pipen muotoon siten, että pipet ovat halkaisijaltaan suurempia ja yhtenäisiä. Pienemmällä yllilämmöllä pipet puolestaan ovat pienempinä huokosina, jotka sijaitsevat laajemmalla alueella. Kuvasta 14 tämä selviää parhaiten. Siinä nähdään selvästi, kuinka erityisesti korkeahiilisillä laaduilla suuremmalla yllilämmöllä valettaessa muodostuu pahempaa pipeä. Kuvassa on vasemmalla luokiteltu pipet viiteen ryhmään, joiden esiintymistä on sitten tutkittu eri hiilialueisilla teräslaaduilla eri valulämpötiloilla.



Kuva 14. Yllilämpötilan vaikutus pipen muodostumiseen eri hiilialueilla /25/

Pipen muodostumisen kannalta on kuitenkin selkeästi yleisen mielipiteen mukaan paras valaa hitaalla valunopeudella, jolloin sulakartio pysyisi lyhyempänä. Näin saataisiin minimoitua pipen muodostuminen valun lopetuksissa ja liitoksissa. Taloudellisten tekijöiden takia ei tietenkään ole kannattavaa valaa koko aikaa pienellä valunopeudella. Bloomin laatua ei myöskään haluta riskeerata, joten valun lopussa käytetään tiettyä lopetushidastusta.

3.8 Valun lopetus

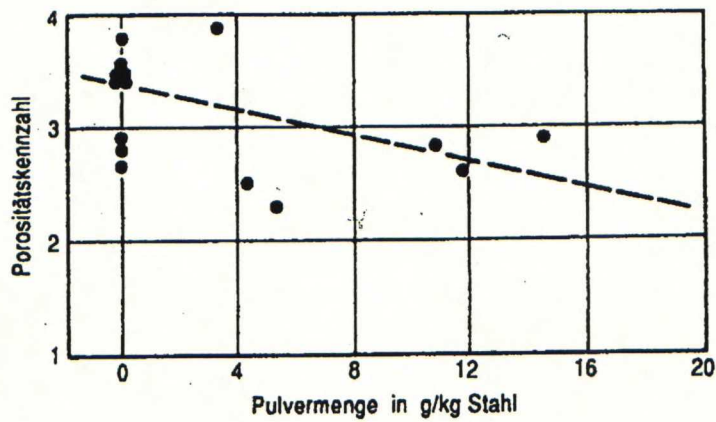
Valun lopetustavasta pääasiallisesti määräytyy muodostuvan pipen suuruus eli se, kuinka paljon terästä sulakartiassa on jähmettymässä. Tämän vuoksi valua ei tulisi koskaan pysäyttää suoraan nollaan, vaan käytettyä valunopeutta tulisi hidastaa ennen sulan syötön loppumista. Tällä tavoin sulakartion pituutta pystyttäisiin lyhentämään mahdollisimman paljon, jolloin pipen muodostuminen on vähäisempää. /3/

Samalla on kuitenkin otettava huomioon, että sula teräs on valun loppuvaiheessa jo ehtinyt jäähtyä, joten sen valettavuus ei ole yhtä hyvää kuin valun alussa. Tämän vuoksi valun lopetuksen yhteydessä suoritettavaa hidastusta ei voida aloittaa liian aikaisin tai kylmä teräs kuroo valuputkessa ja pahimmassa tapauksessa valusarja keskeytyy. Toinen tekijä, joka osaltaan rajoittaa loppuhidastuksen kestoa on valun tuottavuus. Valun lopetushidastusta määriteltäessä onkin optimoitava kannattavan tuotantonopeuden, valettavuuden ja tuotteen laadun kesken paras yhdistelmä.

3.9 Muita pipen muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä

Erilaiset lämmönjohtumiseen, latenttilämpöön ja lämpökapasiteettiin liittyvät tekijät saattavat vaikuttaa pipen muodostumiseen. /13/ Näistä ei kuitenkaan ole löytynyt mitään tutkimustuloksia. Lämmönjohtumiseen liittyen myös bloomin eristys vaikuttaa erityisesti pinnan jäähtymisasteeseen ja voi vaikuttaa myös pipen muodostumiseen. Tästäkään ei kuitenkaan ole löytynyt tutkimustuloksia.

Wünnenbergin ja Jacobin tutkimuksen /26/ mukaan valupulverin määrä vaikuttaa jonkin verran bloomien keskustahuokoisuuteen. Kokeessa käytetty teräs oli matalahiilistä (0.2%C) ja kooltaan suhteellisen pieni bloomi (200x240 mm²). Kuvassa 15 on esitetty heidän esittämänsä verranto valupulverin määrän ja keskustahuokoisuuden muodostumisen välille, josta nähdään kuinka suuremmalla pulverimäärällä keskustahuokoisuuden muodostuminen on jonkin verran vähäisempää.



Kuva 15. Valupulverin määrän vaikutus keskustahuokoisuuteen /26/

4 Pipen vähentäminen

4.1 Yleistä

Pipen ollessa kokonaan bloomien sisällä, se on mahdollista saada jatkokäsittelyissä, kuten valssauksessa tai taonnassa, umpeen jolloin se sulautuu huomaamattomasti muuhun teräkseen. Tämä edellyttää kuitenkin riittävän suurta reduktiota jatkokäsittelyssä tai muuten huokokset jäävät bloomien keskusta. /21/ Ilman kanssa kosketuksissa ollut pipen pinta hapettuu, jolloin sen pintaan muodustuu hilsettä, jonka takia pipe ei mene umpeen jatkokäsittelyissä. Tämän takia avoin pipe on aina romutettava. Tätä ilmiötä käsitellään myös Miekk-ojan Metalliopissa, jossa puhutaan kutistumahuukosista, jotka hitsaantuvat umpeen kuumamuokkauksessa samoin kuin kylmämuokkauksen jälkeen suoritettua hehkutuksessa. Koska kutistumahuukosten sisällä ei ole kaasuja, ei etenkään happea, ne hitsaantuvat umpeen kuumamuokkauksessa samoin kuin kylmämuokkauksen jälkeen suoritettua hehkutuksessa, mikä vaikuttaa tietenkin edullisesti metallin mekaanisiin ominaisuuksiin. /8/

Valun lopetuksessa syntyvää pipeä voidaan vähentää valun lopussa ja liitosta tehtäessä hidastamalla valunopeutta. Tällöin puhutaan lopetushidastuksesta tai lopetusporrastuksesta, jollaista käytettäessä valunopeutta lasketaan portaittain ennen valun loppua. Tarkoituksena on lyhentää sulakartiota, jolloin kutistuvaa sulaa on tilavuudeltaan vähemmän, jolloin myös pipe vähenee. /3/ Mikäli valunopeus pudotettaisiin suoraan käytetystä nopeudesta nolleen, kasvaisi piperiski liian suureksi.

Sulakartion kärjessä tapahtuvan jähmettymisen yhteydessä muodostuvaa sekundääripipeä eli keskustahuukoisuutta voidaan pyrkiä vähentämään monilla eri tavoilla. Yleisimmin käytettyjä menetelmiä ovat erilaiset reduktiomenelmät, kuten terminen ja mekaaninen softreduktio, hardreduktio sekä taonta. Myös sähkömagneettisilla sekoittimilla pystytään vaikuttamaan jähmettymisrakenteeseen ja siten parantamaan sulan teräksen virtaamista jähmettymisvyöhykkeellä, jolloin sekundääripipeä ei muodostu yhtä helposti.

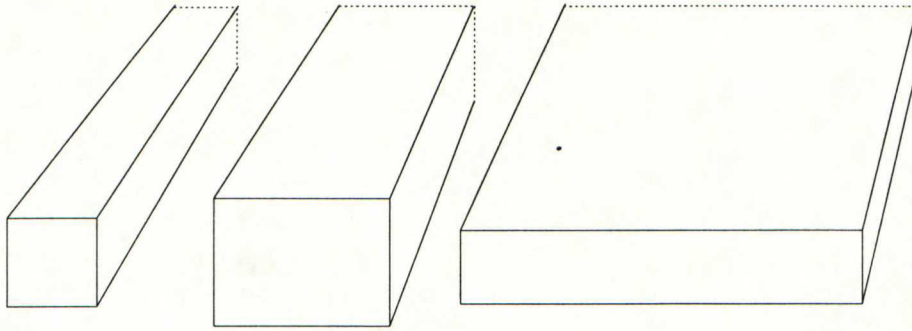
Usein reduktiomenetelmien käyttämisessä ongelmaksi muodostuu liikkuva sulakartion paikka ei-steady-state-valutilanteissa. Myös steady state-tilanteessa tehokkaan reduktion aikaansaaminen on hankalaa, koska valunopeus saattaa olla lämpötilaohjattu. Tästä johtuen sulakartion kärki liikkuu hyvinkin suurella alueella. Mainittakoon esimerkkinä, että Imatra Steelillä valunopeuksilla 0.6 ja 0.8 m/min sulakartion pituudella on n. 5.5 metriä eroa! Tämän vuoksi reduktiota on todella vaikea saada kohdistettua eri valutilanteissa juuri sulakartion kärjen kohdalla.

Muita käytössä olevia menetelmiä pipen vähentämiseksi ovat erilaiset pikajäähdytysmenetelmät ja alhaisella yllilämmöllä valaminen. Näissä menetelmissä on tarkoituksena saada sula teräs jäähtymään nopeammin, jolloin sulakartiokaan ei ehdi kasvaa yhtä pitkäksi kuin perinteisissä jäähdytysjärjestelmissä.

4.2 Terminen softreduktio (TSR)

Termisessä softreduktiossa aihiota kutistetaan jäähdyttämällä oikeaan kohtaan sijoitetulla suutinjäähdytysvyöhykkeellä aihion pintaa voimakkaasti. Jäähdytys tapahtuu tällöin sulakartion kärjen kohdalla, jolloin tehokas jäähdytys lisää pinnan jäähtymisastetta. Mikäli pinnan jäähtymisaste on yhtä suuri tai suurempi kuin keskustan, kutistuu koko aihio niin voimakkaasti, että on todettu pipen muodostumisen olevan selvästi vähäisempää. /13/

Terminen softreduktio toimii sitä paremmin, mitä ohuempi valettava aihio on. /27/ Sen vuoksi sitä käytetäänkin lähinnä teelmillä, mutta myös joskus levyaihioilla ja ohuilla bloomeilla. Edellämainitut eri aihiotyypit on hahmoteltu kuvassa 16, josta selviää parhaiten niiden dimensioerot.



Kuva 16. Teelmä, bloomi ja levyaihio

Termistä softreduktiota käytetään yleensä keskustasuotautumisen vähentämiseen ja siinä yhteydessä sitä käytetään kaikilla aihiotyypeillä. /28/ Menetelmää käytetään hyvin vähän sekundäärisen pipen ja loppupipen vähentämisessä. Osasyynä on varmasti TSR:n herkkyys sulakartion paikan suhteen. Väärässä paikassa suoritettuna se aiheuttaa halkeilua.

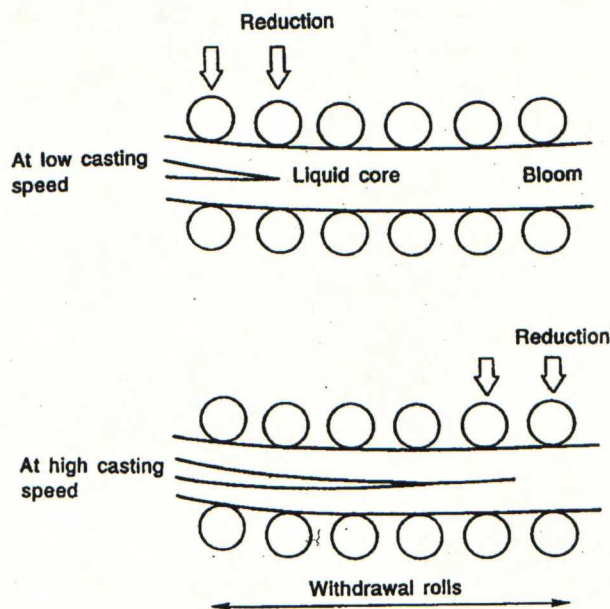
Termisessä softreduktiossa on myös vaarana pinnan uudelleenkuumenemisesta johtuva laajeneminen reduktiovyöhykkeen jälkeen ja siitä johtuva halkeiluriski. /27/ Tämän vuoksi on tärkeää, että reduktiovyöhykkeellä tapahtuva jäähdytys ei ole tarpeettoman voimakasta, vaan jäähdytys on juuri riittävä halutun reduktiovaikutuksen aikaansaamiseksi ilman halkeamariskiä. /29/ Reduktiovyöhykkeellä jäähdytyksen ei tulisi myöskään vähentyä, vaan mieluummin vähintään pysyä vakiona, jotta välttyttäisiin austeniitti-ferriitti-faasimuutoksen yhteydessä esiintyviltä halkeamilta. Kaikkein ongelmallisin tilanne edellämainitun faasimuutoksen yhteydessä on silloin, jos ahiota aletaan oikaista juuri silloin kun kalvomainen ferriittifaasi on alkanut muodostua austeniittifaasien väliin jolloin sitkeys on heikoimmillaan. Tätä halkeilua esiintyy erityisesti levyaihioiden kulmissa.

4.3 Mekaaninen softreduktio (MSR)

Mekaanisessa softreduktiossa tarkoituksena on puristaa sulakartion kärjessä jähmettyvää sulakartion kärkiosaa kasaan erityisillä lisärullilla, jolloin sekundääripipet vähenevät ja parhaassa tapauksessa jopa poistuvat kokonaan.

/5,21,30/ Myös keskustasuotautumisen vähentämiseen tätä menetelmää on käytetty hyvin tuloksin. /19,31/

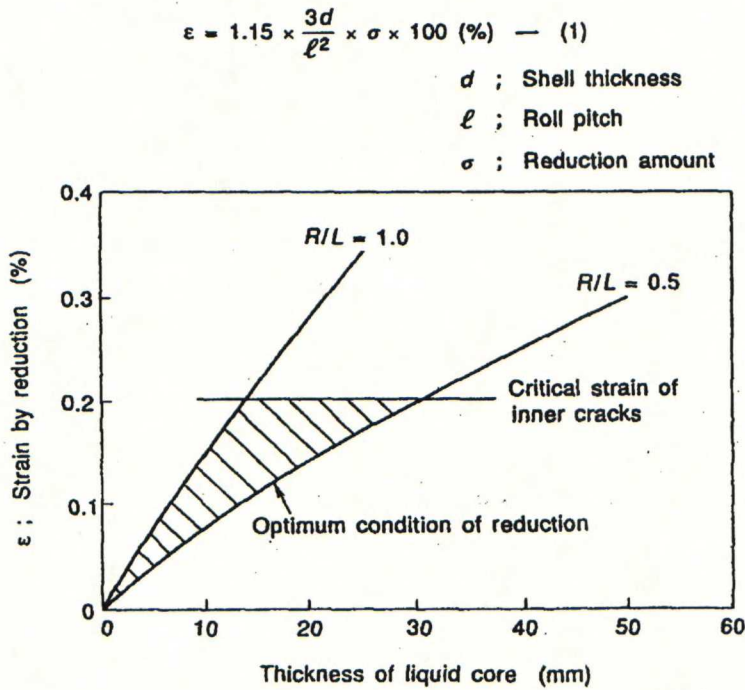
Reduktiorullat asennetaan yleensä aika laajalle alueelle, jotta niillä saadaan mahdollisimman tehokas reduktio sulakartion kärjen kohdalla. Samoin yhden rullaparin aiheuttama reduktio ei ole yleensä kovin suuri, jotta vältetään mahdolliset halkeamat ja muut viat. Yhdellä rullalla suoritettava reduktio voi olla maksimissaan luokkaa 1-2.5 mm. /27/ Reduktiorullien määrä on yleensä 4-6 rullaparia, riippuen hieman valettavasta bloomikoosta. Ensimmäisen rullan sijainti tulisi olla siinä kohdassa, jossa kiinteän faasin osuus bloomien keskellä puuroalueessa on 0.2 ja reduktio tulisi lopettaa kun osuus on 0.7. Tällöin saavutetaan kaikkein tehokkain reduktio. /27,31/ Rulla-alueen pituus vaihtelee valukoneen koosta ja käytetystä valunopeudesta riippuen noin neljän ja viiden metrin paikkeilla, mutta joskus saatetaan käyttää jopa yhdeksän metriä pitkää rullavyöhykettä. Reduktion oikea suorituskohda nähdään kuvasta 18.



Kuva 17. Mekaanisen softreduktion rullat ja niiden sijainti /21/

Shumiyan et al /21/ ovat tutkineet optimaalisia tekijöitä bloomien mekaaniselle softreduktiolle. Heidän tutkimuksestaan on esitetty yksi tulos kuvassa 18, jossa R on

reduktion suuruus ja L on sulan keskustan paksuus reduktiohetkellä. Kuvasta nähdään hyvin se alue, jolla reduktio voidaan suorittaa ilman suurempia riskejä sisäisistä halkeamista. Kuvassa on esitetty myös kaava, jolla ϵ eli reduktion aiheuttama rasitus voidaan määrittää. Tutkimuksissa bloomien koko oli $410 \times 530 \text{ mm}^2$, joten sulan keskustan paksuus on suhteutettava käytettyyn bloomikokoon, kun verrataan tuloksia muilla valukoneilla.



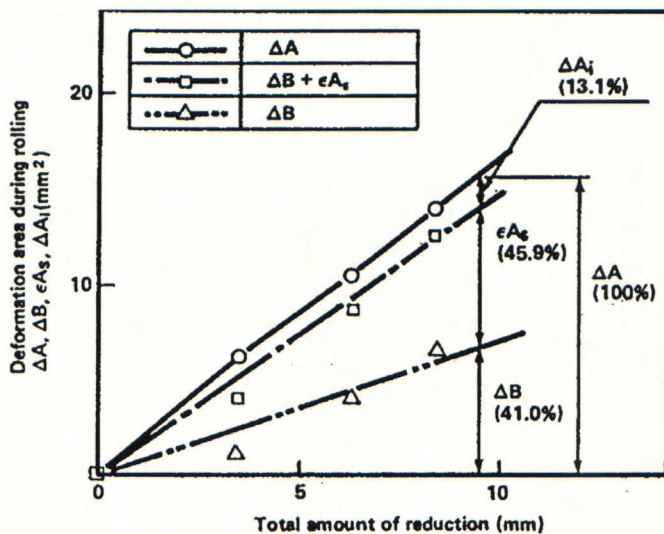
Kuva 18. Optimaalinen tilanne bloomien mekaaniselle softreduktiolle /21/

Reduktiorullien sijainnin, määrän ja puristusvoiman lisäksi myös niiden muoto voi vaikuttaa tuloksiin. Rullien muoto voi olla tasainen, tynnyrimäinen tai ulokkeellinen. Tynnyrimäisillä ja ulokkeellisilla rullilla saadaan voimakkain reduktio kohdistettua parhaiten haluttuun kohtaan eli aihion keskusta. Negatiivisena puolena näillä on sisäisten halkeamien vaara sekä mahdolliset ongelmat bloomien muodon suhteen. Tasaisilla rullilla sisäisten halkeamien vaara ei ole yhtä suuri, mutta ongelmaksi muodostuu reduktion mahdollinen riittämättömyys. Rullien eri muotoja on esitetty kuvassa 19, jossa vasemmalla on tynnyrimäinen ja oikealla ulokkeellinen reduktiorulla.



Kuva 19. Mekaanisen softreduktion rullatyypit /31/

Mekaanista softreduktiota käytetään yleensä bloomeille ja slabeille. Teelmillä suurin haitta on reduktiovoimien aiheuttama aihion leventyminen. Neliskulmaisen poikkileikkausmuodon muuttuminen suorakaidemaiseksi haittaa esimerkiksi teelmien siirtämisessä useilla arinoilla. Myös bloomien ja slabien kohdalla suurin osa reduktiovoimista siirtyy aihiota pidentäviin ja leventäviin voimiin. /5/ Mekaanisen softreduktion tehokkuus riippuukin siitä, kuinka paljon reduktiovoimista saadaan kohdistettua aihion kokoonpuristaville voimille, jotka vähentävät pipeää. Obibayashi et al /31/ tutkivat reduktiovoimien jakautumista eri voimien välillä $300 \times 400 \text{ mm}^2$ bloomeilla. Tuloksena oli että 41% reduktiovoimasta kohdistuu leventävään vaikutukseen (ΔB), 46% pidentävään (ϵA_s) ja vain 13% sulan keskustan reduktioon (ΔA_i). Kuvasta 20 nähdään kuinka voimat jakaantuivat kokeen aikana eri reduktion määrillä.

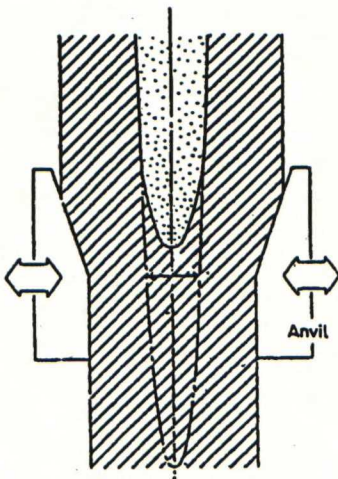


Kuva 20. Bloomin muodonmuutokset reduktiomäärän funktiona /31/

Reduktion vaikutus ei ole riippuvainen käytetystä valunopeudesta, vaan kaikilla nopeuksilla voidaan pipeä vähentää. /5/ Tärkeää on myös tässä yhteydessä muistaa, että oikea kohta mekaanisen softreduktion suorittamiselle siirtyy valunopeuden vaihtuessa, joten myös rullajärjestelmää on pystyttävä liikuttamaan.

4.4 Taonta ja tasopuristus

Taonta (forging) ja tasopuristus (plane reduction) ovat periaatteeltaan hyvin läheisiä menetelmiä mekaanisen softreduktion kanssa. Kaikissa niissä pyritään puristamaan bloomia kasaan, jotta sekundääripipet ja muu keskustassa oleva huokoisuus menisivät kasaan ja keskustasuotautuminen vähenisi. Taonnassa bloomia puristetaan kasaan erityisillä alasimilla, jotka ovat jatkuvassa liikkeessä edestakaisin. Kuva 21 selvittää tarkemmin taontalaitteiston vaikutusta.

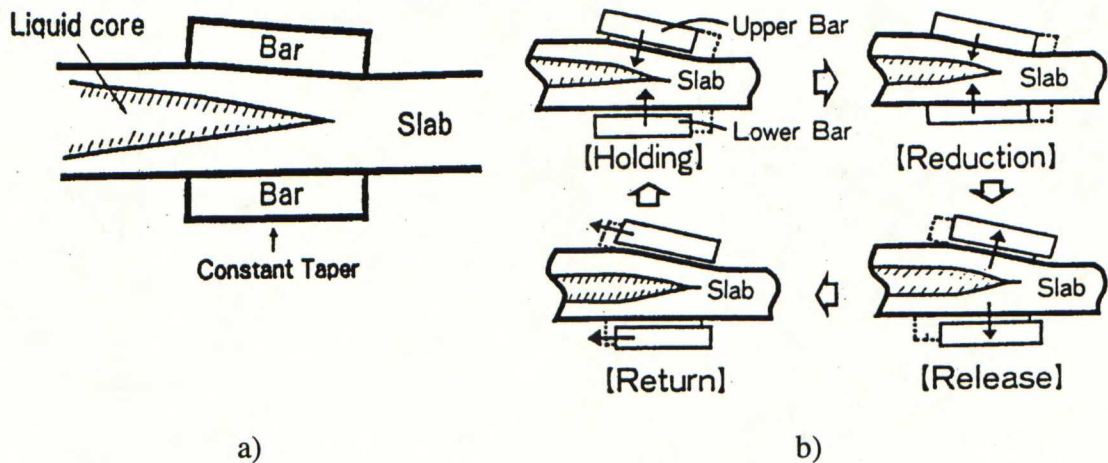


Kuva 21. Taontalaitteisto /32/

Pääasiallinen taonnan tarkoitus yleensä on vähentää keskustasuotaumaa, mutta myös keskustahuokoisuus poistuu todella tehokkaasti, kuten Kushida et al /32/ tutkimuksessaan toteavat.

Toinen taonnankaltainen menetelmä on tasopuristimien käyttö. Tasopuristusta voidaan käyttää joko paikallaan pysyvänä bloomia kaventavana "aukkona" tai

liikkuvina tasopuristuspintoina. Kuvassa 22 on näistä molemmista menetelmistä esitetty periaatekuvat. Paikallaan olevien tasojen on todettu aiheuttavan enemmän ongelmia bloomien pintaan, kuin liikkuvien tasopuristimien käyttö. /33/



Kuva 22. Tasopuristuslaitteistot a) paikallaan oleva ja b) liikkuva /33/

Kuten mekaanisessa softreduktiossa, myös taonnassa ja tasopuristuksessa voi esiintyä sisäisten halkeamien muodostumista liian suuren reduktiovoiman kohdistuessa bloomiin. /32/

4.5 Sähkömagneettiset sekoittimet (EMS)

Sähkömagneettisia sekoittimia käytetään jatkuvavalussa kokilleissa (MEMS), sekundäärijäähdytysvyöhykkeen alueella (SEMS) ja aihion jäähmettymisen loppualueella (FEMS). Kokillin alueella toimivat magneettisekoittimet parantavat teräksen kuonapuhdautta ja laatua, sekä lisäävät tasa-akσιαalisen kiderakenteen muodostumista katkomalla jäähmettyvien pylväsdendriittien kärkiä. Lisäksi ne pienentävät sulan yllämpöä ja näin auttavat nopeuttamaan jäähmettymistä. /34/

Kauempana meniskuksesta, sekä heti kokillin alapuolella, että lähempänä sulakartion kärkeä sijaitsevat sähkömagneettiset sekoittimet vaikuttavat myös bloomien jäähmettymisrakenteeseen. Sekoittimen aiheuttamat voimakkaat sulan virtaukset katkovat jäähmettyvien pylväsdendriittien kärkiä, joista muodostuu uusia tasa-

aksiaalisia kiteitä bloomin keskustaan. /35/ Tällöin bloomin keskustaan ei pääse muodostumaan yhtä voimakkaasti sekundääripipettä, kuin voimakkaasti pylväskidemäisen keskustarakenteen omaavilla bloomeilla.

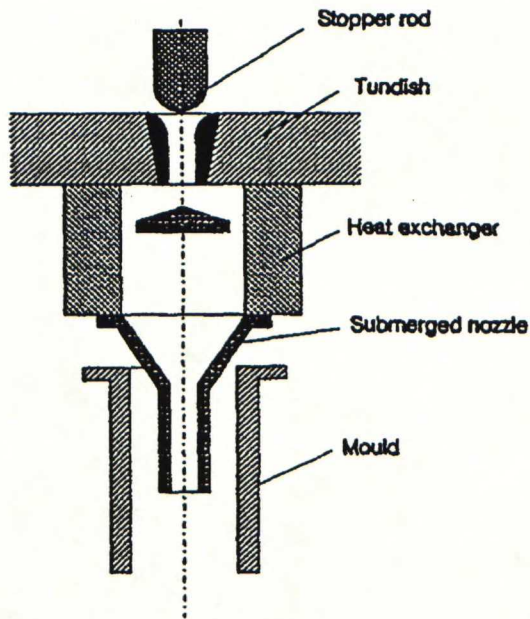
Tutkimusten mukaan EMS:ien käyttö vähentää pipen muodostumista, mutta niiden vaikutuksen voimakkuudesta on hieman erilaisia mielipiteitä. Förster et al /35/ ovat tutkineet sekundäärijäähdytysvyöhykkeen sähkömagneettisen sekoittimen (SEMS) käyttöönottoa teelmävalukoneella. Tutkimustuloksien mukaan pipen muodostuminen on selvästi vähentynyt SEMS:n käyttöönoton jälkeen. Raihlekin on todennut tutkimuksissaan /36,37/ kaikkien kolmen sekoitintyyppin parantavan osaltaan sulassa olevien epäpuhtauksien ja huokosten jakautumista ja siten sekä parantavan keskustahuokoisuutta että vähentävän pipen muodostumista. Schrewe puolestaan on tullut siihen lopputulokseen, että sähkömagneettiset sekoittimet vain vähän auttavat vähentämään pipen muodostumista, eikä niitä kannata itsessään pitää minään taikalaitteina. /20/

4.6 Valaminen lähellä likviduslämpötilaa

Uusimpia menetelmiä parantaa valutuotteen laatua on suorittaa valu lähellä sulan likviduslämpötilaa. Belgialaiset Wilmotte ja Naveau esittävät artikkelissaan /38/ tuloksia kokeista, joissa on yhdistetty sulan jäähdytys välialtaan ja kokillin välillä, tavallista voimakkaampi jäähdytys kokillissa ja sekundäärijäähdytysvyöhykkeellä sekä korkea valunopeus. Kokeita tehtiin alussa laboratoriomittakaavassa, mutta positiivisten tulosten jälkeen siirryttiin kokeisiin erilliselle valukoneelle ja sen jälkeen normaalin tuotantolinjan valukoneelle.

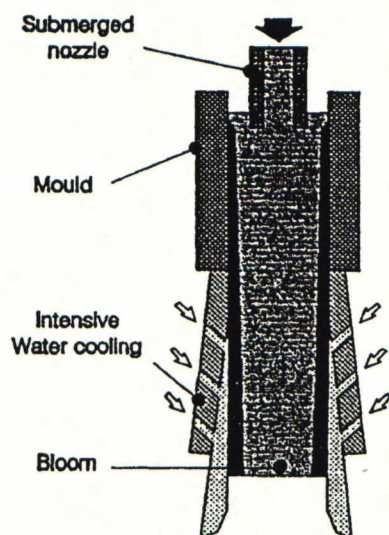
Valaminen matalalla yllilämmöllä, lähes likviduslämpötilassa, tuo bloomin keskelle laajan tasa-aksiaalisten kiteiden vyöhykkeen, minkä on todettu aikaisemmissakin kappaleissa vähentävän pipen muodostumista. Suurin ongelma matalalla yllilämmöllä valamiseen on juuri matala yllilämpö eli viileä teräs, joka herkästi jähmettyy. Belgialaisten kehittämässä menetelmässä välialtaasta kokilliin laskettava teräs kulkee jäähdyttävän lämmönvaihtimen kautta. Jäähdytetty teräs jähmettyy nopeammin

kokillissa ja tuo bloomien keskustaansa tasa-aksaalisen rakenteen. Kuvassa 23 on esitetty lämmönvaihdin ja muut osat välialtaan ja kokillin välillä.



Kuva 23. Lämmönvaihdin välialtaan ja kokillin välissä /38/

Valamiseen lähellä likviduslämpötilaa ja korkealla valunopeudella on yhdistettävä erittäin tehokas jäähdytys kokillissa, jotta bloomien kuori ehtisi kasvaa riittävän paksuksi. Samoin kokillin alapuolella on jäähdytettävä tehokkaasti, jotta sulakartion pituus ei olisi liian pitkä. Pahin ongelma voisi olla, että bloomien leikkaaminen ei onnistuisi, koska sulakartio ulottuisi leikkureille asti. Kuvassa 24 on esitetty belgialaisten käyttämä intensiivinen jäähdytyksen laitteisto, jossa bloomien pintaan luodaan turbulenttinen filmikerros syöttämällä suuri määrä vettä vain muutaman sentin päässä bloomien pinnasta.



Kuva 24. Periaate intensiiviselle jäähdytykselle kokillin alapuolella /38/

Yhdistämällä edellä esitetyt menetelmät ja käyttämällä kaksinkertaista valunopeutta (1.6 m/min) 220 mm halkaisijaltaan olevien bloomien valmistuksessa on saatu erittäin hyviä tuloksia keskustahuokoisuuden ja keskustasuotautumisen vähenemisen yhteydessä. Tämän lisäksi on hyvä muistaa huomattava taloudellinen etu valettaessa puolet lyhyemmässä ajassa sama teräsmäärä kuin ennen ja vielä paremmalla sisäisellä laadulla.

Muita tutkittuja mahdollisuuksia valaa matalalla yllilämmöllä on mm. Shiraishin et al /39/ kehittämä välialtaan induktiolämmitin ja Camachon et al /40/ kehittämä välialtaan plasmalämmitin. Näiden periaatteena on pitää välialtaan lämpötila tasaisena, jolloin sula voi olla viileämpää ilman kuromisvaaraa. Kokemukset ovat yleisesti olleet positiivisia.

Voimakkaasta jäähdytyksestä sekundäärivyöhykkeellä heti kokillin alapuolella on myös saatu hyviä kokemuksia. Ameling et al /41/ ovat todenneet tutkimuksessaan voimakkaan jäähdytyksen olevan hyvä keino sisäisen rakenteen parantamiseen.

5 Aineisto ja tutkimusmenetelmät

5.1 Kokeet

Diplomityön kokeellinen osa suoritettiin Imatra Steelin terästehtaan bloomivalukoneella normaalin tuotannon ollessa käynnissä. Lähtökohtana oli kartoittaa pipen esiintymistä eri hiilipitoisuuksilla teräsbloomeissa, pipen esiintymiseen vaikuttavia tekijöitä sekä hahmottaa pipen suuruutta eri valutilanteissa. Lopulliseksi tavoitteeksi asetettiin pipen vähentäminen lopetusbloomeissa valuprosessin lopetus- ja liitospraktiikkaa parantamalla.

Ennen kokeiden aloittamista tutkittiin MTT-tietokannasta kerättyä prosessidataa. Erityisesti tutkittiin liitosta edeltävien valujen viimeisten bloomien romutuspituuksien ja niiden pipemerkintöjen mahdollisia korrelaatioita. Tärkeää oli myös saada selville, kuinka paljon pipehavaintoja esiintyy eri liitostavoilla ja eri teräslaaduilla.

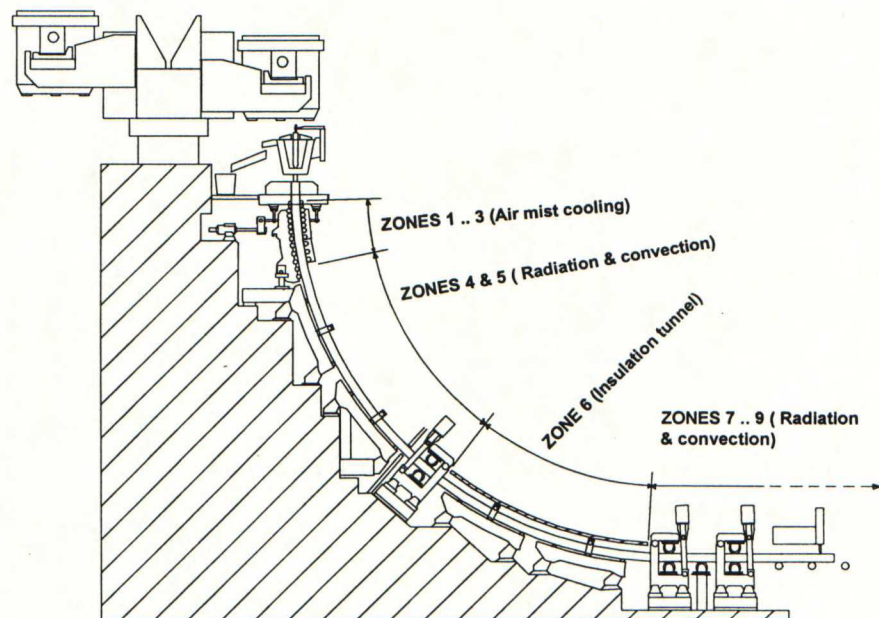
Kokeet aloitettiin tekemällä yksi erikoiskoe, jossa viimeisistä bloomeista romutettiin normaalia lyhyemmät liitospalat. Toinen bloomeista leikattiin paloiksi ja halkaistiin, toinen puolestaan valssattiin kuumavalssaamalla teelmiksi, jotka tarkastettiin teelmänkäsittelyosastolla. Kokeen avulla pyrittiin selvittämään pipen muotoa ja esiintymistä lopetusbloomeissa.

Kokeita jatkettiin aineistokokeilla kolmen eri hiilialueen laaduille, yhteensä 16 sulatukselle. Näissä kokeissa liitospalan loppuromu oli viimeisistä bloomeista normaali eli noin 190 ± 5 cm. Aineistokokeen bloomit valssattiin teelmiksi normaalin tuotantosuunnitelman mukaisesti. Teelmät ajettiin valssauksen ja leikkauksen jälkeen omalle arinalleen, jotta niiden järjestys voitiin merkitä. Kokeiden tarkoituksena oli saada parempi kuva siitä, miten pipetapaukset esiintyvät eri laaduilla ja erityisesti miten hiilipitoisuus vaikuttaa käytännössä pipen muodostumiseen. Aineistokokeiden jälkeen tehtiin vielä yksi pikaseislopetus, josta saatiin vertailuaineistoa nykyiseen lopetusporrastustapaan. Samoin tuosta kokeesta saatiin tietoa siitä, miten suuri pipe muodostuu, kun valu joudutaan lopettamaan ilman loppuporrastuksia.

Aineistokokeista saadun tiedon perusteella kokeiltiin tehdä muutoksia lopetusporrastukseen ja jäähdytykseen liitostapauksissa. Näitä muutoksia kokeiltiin käytännössä tekemällä kaksi lopetuskoetta. Tarkoituksena oli ajaa lopetusporrastuksella sulakartiota lyhyemmäksi, jotta pipeä saataisiin pienennettyä. Jäähdytyksen vaikutusta tutkittiin jälkimmäisessä kokeessa ottamalla toiselta linjalta paineilmajäähdytys pois päältä, kun valunopeus oli pudotettu nolleen. Jäähdytyksen vähentämisellä haluttiin kokeilla, vaikuttaako jäähdytyksen vähentäminen pipen muodostumiseen. Pienemmän jäähdytyksen juuri kokillin alapuolella pitäisi edesauttaa sulan parempaa virtausta.

5.2 Valukone

Imatra Steelin jatkuvavalukone on kaksilinjainen bloomivalukone, jonka kokillikoko on kiinteä 280 mm x 350 mm. Valukoneen rakenne ja tekniset tiedot on esitetty taulukossa 2 ja kuvassa 25. Valukoneen kuvaan on merkitty myös aihiota jäähdyttävät vyöhykkeet ja niillä esiintyvät lämmönsiirtoilmiöt.



Kuva 25. Imatra Steelin bloomivalukone

Taulukko 2. Valukoneen teknisiä tietoja

Merkki / malli	Mannesmann Demag, vm. 1988
Panoskoko	75 t
Välialtaan tilavuus	12 t
Koneen säde	15 m, yksipisteoikaisu
Metallurginen pituus	23.3 m (meniskus – oikaisukone)
Kokillien määrä ja koko	2 kpl á 280x350mm
-tyyppi	Cu-levykokilli, 12 mm viiste kulmissa, ei pinnoitettu
-iskunpituus	6 mm
-iskutaajuus	120 1/min (valunop. 0.7 m/min), kytketty valunopeuteen
-pinnankorkeuden säätö	Radioaktiivinen, Co60 säteilijä
Valunopeus	0.4 – 0.8 m/min (kokillisekoitin päällä)
Toisiojäähdytys	Vesi-ilma
-ohjaus	Dynaaminen, kytketty valunopeuteen
-vyöhykkeiden lukumäärä	3, I: 460 mm, II: 1315 mm, III: 680 mm
Aihion leikkaus	Happi-maakaasupoltin
Bloomien pituus	3.6 – 6 m

Bloomin suuresta poikkileikkauspinta-alasta ja karkeasta kiderakenteesta johtuen pipen tutkiminen suoraan bloomeista on ainetta rikkomattomilla tutkimusmenetelmillä erittäin vaikeaa. Esimerkiksi ultraäänitutkimus suoraan bloomista ei anna juuri mitään tuloksia. Tämän vuoksi pipen tutkiminen tapahtui lähinnä kuumavalssatuista teelmistä, joiden poikkileikkauspinta on sivunpituudeltaan 135 mm oleva neliö. Teelmiä tutkittiin teelmäntarkastusasemalla normaalin tarkastuksen yhteydessä skannaamalla niitä ultraäänilaitteella. Tämän lisäksi erityisen kiinnostavia teelmän kohtia tarkasteltiin kannettavalla Krautkrämer käsiultraäänilaitteella. Teelmän pinnalle laitettiin vettä, jotta saataisiin parempi kontakti teelmän pinnan ja ultraäänilaitteen luotaimen välille. Käsiultrassa käytettiin 2 MHz:n taajuudella toimivaa luotainta, joka on havaittu parhaaksi 135 mm:n teelmiä tutkittaessa. Ultraäänitutkimuksessa käytettävä taajuus on havaittavien virheiden suuruuden ja tunkeutumisvyvyyden kompromissi. Suuremmalla taajuudella

saadaan pienempiä virheitä esiin, mutta samalla tunkeutumisvyvyys pienenee äänen vaimenemisen takia. /42/

5.3 Pipen muodostuminen valun eri vaiheissa

Jatkuvavalun alussa ja valun normaalitilanteessa pipeä ei pääse syntymään, koska muodostuvaan jähmettymiskutistumaan syötetään jatkuvasti uutta sulaa. Myöskään normaalissa sekvenssiliitoksessa eli senkanvaihdoissa, jossa teräslaatu pysyy samana, teräksen syöttö jatkuu keskeytyksettä, jolloin ei pipeäkään synny. Valun aloituksesta käytetään Imatralla koodia 0 ja sekvenssiliitoksesta koodia 1.

Teräslaataa vaihdettaessa väliallas valetaan niin tyhjäksi kuin on mahdollista, kuitenkin jättäen kuonat, peitosaineet ja sulkeumat välialtaaseen. Teräksen ollessa aivan lopussa kokilli valetaan lähes täyteen sulaa, minkä jälkeen linja suljetaan. Sulan pinta puhdistetaan valupulverista ja mahdollisesta kuonasta, jonka jälkeen kokillissa olevan sulan päälle ja puoliksi sulan sisään lasketaan liitoskori, johon uusi teräs saadaan tarttumaan, kun valua taas jatketaan. Sillä aikaa väliallas ajetaan sivuun ja joko lasketaan tyhjäksi ja ajetaan takaisin valukoneen päälle tai mikäli välialtaan vuoraus on liian kulunut, vaihdetaan tilalle uusi esilämmitetty väliallas. Ensin mainittua liitosvaihtoehtoa kutsutaan jojoliitokseksi ja jälkimmäistä altaanvaihdoksi. Näiden koodit ovat 3 ja 4. Kun allas on saatu takaisin valukoneelle, voidaan valua taas jatkaa.

Jojoliitoksessa ja altaanvaihdossa pipen muodostuminen on kaikkein suurinta, koska uutta terässulaa ei enää syötetä kokilliin ja samalla teräs koko ajan jähmettyy muodostaen suuren kutistuman. Kutistuman aiheuttama sulan ”imuvirtaus” bloomin alempiin osiin oli helppo havaita korin asettamisen jälkeen, jolloin teräksen pintaan muodostuu aivan selviä reikiä korin aukkokohtiin. Bloomin päästä alkavan onkalon muotoja on esitetty kokeiden tulosten yhteydessä.

Normaalissa valun lopetuksessa, joka tehdään työviikon päätteeksi tai jonkin valun pysäyttämistä vaativan korjauksen takia, toimitaan lähes samalla tavalla sulan

loppumiseen asti kuin laadunvaihtoliitosten yhteydessä. Määrätyllä välialtaan tonnimäärällä valunopeutta aletaan hidastaa, jotta sulakartiota saadaan ajettua lyhyemmäksi. Teräksen ollessa loppumaisillaan, kokilli lasketaan täyteen terästä, jonka jälkeen valunopeus pysäytetään. Väliallas ajetaan pois valukoneen päältä ja bloomien yläpinta kastellaan vesisuihkulla jähmeäksi. Seuraavaksi aletaan ajaa bloomia ulos valukoneesta ryömintänopeudella 0.3 m/min. Hetken kuluttua nostetaan ulosajonopeus kolmen minuutin ajaksi 1.0 m/min:in, jonka jälkeen jatketaan 15 minuutin ajalla nopeudella 0.5 m/min. Tämän jälkeen loppubloomi ajetaan ulos valukoneesta nopeudella 0.7 m/min:ssa.

Valun lopetuksessa pipen muodostuminen ei ole yhtä suurta kuin jojoliitoksessa tai altaanvaihdossa, koska teräksen voidaan antaa rauhassa jähmettyä, eikä kiirettä uuden valun aloittamiseen yleensä ole. Valun lopetuksella ei sinänsä ole mitään koodia, mutta luonnollisesti lopetusta seuraa jonkin ajan kuluttua valun aloitus jonka koodin kerrottiin jo aikaisemmin olevan 0.

Pipen muodostumista tutkittiin jojoliitosten ja altaanvaihtojen yhteydessä, koska tällöin niitä esiintyy eniten ja silloin muodostuvilla pipeillä on myös vakavin vaikutus.

5.4 Pipetapausten esiintyminen bloomivalukoneella

Pipetapausten esiintymistä viimeisen bloomien loppupäässä tarkkaillaan valukoneella. Bloomien leikkausta valvova henkilö katsoo aina valusarjan viimeisen bloomien loppuleikkauksen ja mikäli hän havaitsee siinä pipen, merkitsee hän sen loppuromutustietojen yhteyteen prosessitietokoneeseen. Merkintänä on tuolloin P-kirjain. Merkintä on muotoa 108-190P, joka tarkoittaa että ensimmäisen linjan kahdeksannesta (08) bloomista on leikattu 190 cm pitkä loppuromu ja tämän leikkauksen jälkeen on bloomien loppupäässä havaittu pipe.

Havaittujen P-merkintöjen esiintymistä haluttiin luonnollisesti tutkia eri laaduilla ja eri liitostavoilla. Samoin toivottiin että loppuromun pituudella olisi joku yhteys pipen

esiintymiseen. Tätä tutkimista varten prosessitietokone MTT:ltä tehtiin haku, jossa haettiin valun tunnistetietoja, valunopeudet, sulan lämpötilat ja jo aikaisemmin mainitut loppuromutiedot. Hakuun otettiin mukaan 10000 uusinta sulatusta. Aineistoon tulivat kaikki sulatukset aikaväliltä 20.3.1997-11.10.1999, eli aineiston voidaan sanoa olevan riittävän kattava. Näistä eriteltiin P-merkintäiset sulatusten viimeiset bloomit. Sulatuksista eriteltiin vielä pipe-tapaukset molemmille linjoille sekä lisäksi pipe-tapausten loppuromujen pituudet.

5.5 CASIM

Jatkuvavalun kulkua ja erityisesti sulakartion pituutta simuloitiin CASIM-ohjelmalla. Ohjelma on kehitetty Teknillisessä korkeakoulussa ja sillä pystytään simuloimaan valun etenemistä kaikissa valun vaiheissa. Tarvittavat prosessitiedot syötetään joko syöttötiedostossa tai manuaalisesti ohjelman käyttöliittymästä käsin. Syöttötiedosto on muotoa: aika, valunopeus, kokillin vesimäärä, kokilliveden sisäänmenolämpötila, kokilliveden ulostulolämpötila, välialtaan yllilämpö, jäljellä olevien valutonnien määrä.

Ohjelma tarvitsee määrittelytiedostoiksi tietoja muun muassa valukoneen jäähdytyksestä kokillissa ja toisiojäähdytysvyöhykkeellä sekä kokillin ja valukoneen dimensioista. Nämä arvot määritellään TEMPSIMU-ohjelmalla ja CASIM lukee ne erillisistä määrittelytiedostoista. TEMPSIMU on myös kehitetty Teknillisessä korkeakoulussa.

6 Tutkimustulokset

6.1 Prosessidatan analysointi

Prosessitietokannasta aikaväliltä 20.3.1997-11.10.1999 poimitut sulatustiedot ryhmiteltiin sen mukaan mikä seuraavan valukoneelle tulevan sulatuksen liituskoodi oli. Näistä tiedoista saatiin selville eri liitostapojen yhteydessä esiintyvien pipemerkintöjen määrät. Sulatuksista eriteltiin vielä molempien linjojen viimeisten bloomien pipemerkinnät ja loppuromun pituudet erikseen. Näiden tapausten eri määrät ja niiden prosenttiosuudet on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Pipemerkintöjen esiintyminen eri liitosten yhteydessä

	Aloitus	Jojoliitos	Altaanvaihto	Yht. (0,3,4)	Sekvenssi	Yhteensä
Sulatukset	799	3391	1424	5614	4346	9960
P-merkintöjä (kpl)	141	1954	968	3063	0	3063
%-osuus	17.65	57.62	67.98		0	
Viimeiset bloomit	1598	6782	2848	11228	8692	19920
P-merkintöjä (kpl)	187	3023	1524	4734	0	4734
%-osuus	11.70	44.57	53.51		0	

Taulukosta nähdään kuinka pipemerkintöjä esiintyy suhteellisesti eniten altaanvaihtojen yhteydessä sekä sulatuksista että viimeisistä bloomeista laskettuna. On kuitenkin hyvä huomata altaanvaihtoja tehtävän alle puolet jojoliitosten määrästä, joten määrällisesti eniten, noin 63.9 prosenttia, pipemerkinnöistä havaitaan jojoliitoksissa. Edellämainittu pipemerkintä tarkoittaa siis leikkurimiehen tekemää pipehavaintoa viimeisen bloomien loppuleikkauspinnassa. Altaanvaihtojen yhteydessä havaittujen pipemerkintöjen määrä on 32.2 prosenttia, joten myös niitä esiintyy huomattavasti. Valun lopetuksen yhteydessä pipemerkintäisten bloomien osuus on vain 11.7 prosenttia ja niiden suhteellinen osuus kaikista viimeisistä pipemerkintäisistä bloomeista on vain 3.9 prosenttia. Tämä voidaan selittää sillä, että valua lopetettaessa ei yleensä ole kiire aloittaa seuraavaa valusarjaa ja sulakartio ehtii rauhasa jähmettyä. Pipemerkintöjen määrien ja prosenttiosuuksien perusteella on järkevää kohdistaa pipen vähentämisen tutkiminen vain jojoliitosten ja altaanvaihtojen yhteyteen.

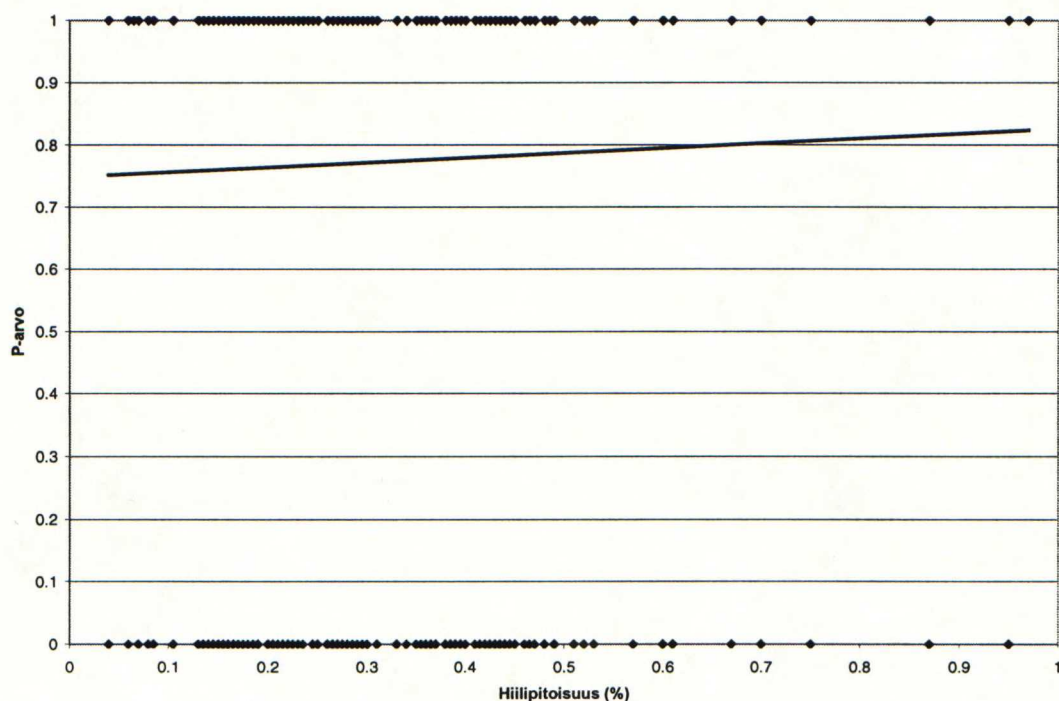
Sulatuksissa, joissa on havaittu pipeä, pipemerkintäisten bloomien määrä on keskimäärin 1.55 P-merkintää/sulatus. Keskimäärin siis yhtä usein pipe havaitaan joko vain toisella tai molemmilla linjoilla.

Eri tekijöiden kuten hiilipitoisuuden, loppuromun pituuden, viimeisen bloomin valunopeuden ja välialtan sulan yllämmön vaikutusta pipemerkintään tutkittiin. Tutkimuksessa pipemerkinnälle on käytetty arvoa 1 mikäli pipe on havaittu ja arvoa 0 mikäli pipeä ei ole havaittu olevan. Tarkasteltavaksi otettiin ainoastaan ne sulatukset, joissa oli P-merkintä, eli yhteensä 3063 sulatusta joissa oli 6126 viimeisen bloomin tiedot. Tapausten suuresta määrästä ja vain kahden y-akselin arvon (0 ja 1) olemassaolon takia eri tekijöiden verrantokuvaajista ei pelkkien datapisteiden avulla voida juurikaan tehdä johtopäätöksiä. Tämän vuoksi kuvaajiin on lisätty trendiviiva osoittamaan datapisteiden painottuneisuutta. Tästä viivasta voidaan nähdä miten pipemerkinnät painottuvat eri tekijöiden suhteen.

Teräksen seostuksella ja erityisesti hiilipitoisuudella uskottiin teorian pohjalta olevan suuri merkitys pipen muodostumiselle. Dataan lisättiin kunkin laadun hiilipitoisuus, jotta voitiin piirtää verrantokuvaaja hiilipitoisuuden ja P-arvon välille. Tämä kuvaaja on esitetty kuvassa 26. Kuvasta nähdään kuinka trendiviiva on hienoisessa nousussa eli suuremmilla hiilipitoisuuksilla havaitaan suhteessa enemmän pipeä kuin matalahiilisillä laaduilla.

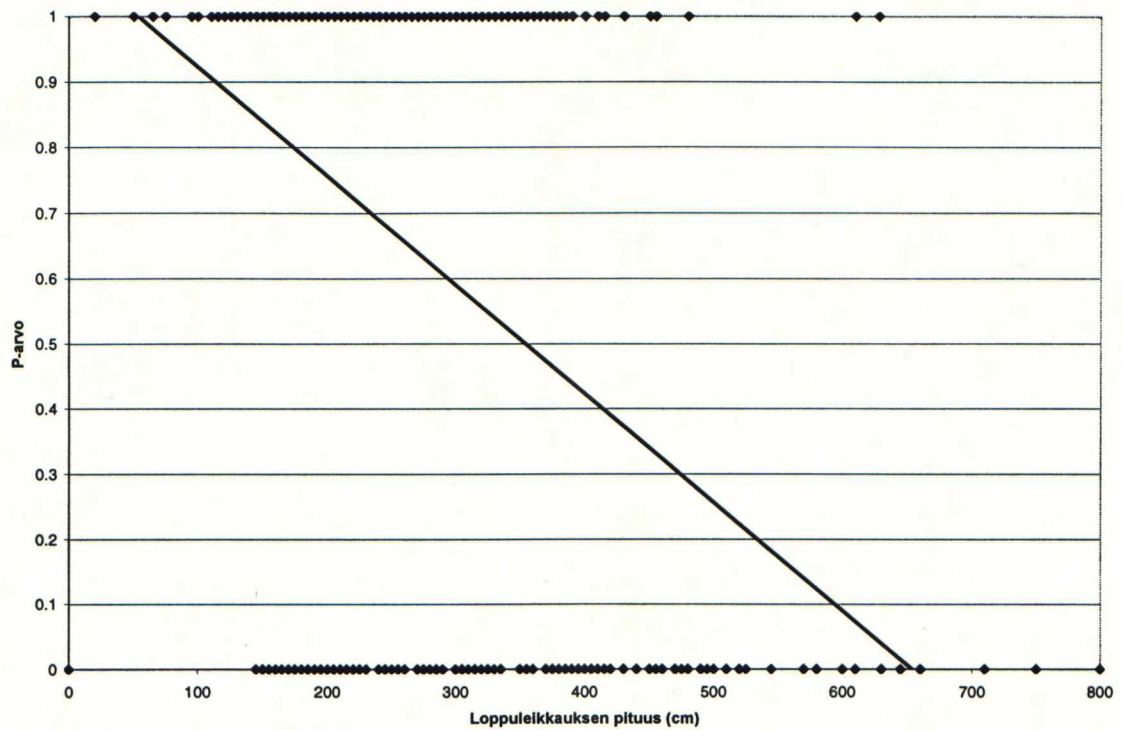
Kuvan 26 datassa, kuten kaikissa muissakin verrantokuvaajissa tässä kappaleessa, on mukana vain sellaiset sulatukset, joissa vähintään toisella lopetusbloomilla on pipemerkintä. Hiilipitoisuuden vaikutusta haluttiin kuitenkin tutkia tarkemmin, joten MTT:n datasta valittiin erikseen kaikki ne laadut, joilla oli yli kaksikymmentä pipemerkintäistä sulatusta. Näille laaduille haettiin alkuperäisestä datasta kaikkien sulatusten määrät. Näin päästiin vertaamaan pipemerkintäisten lopetusbloomien esiintymistä eri hiilipitoisuuksilla, kun mukana olivat myös pipemerkittömät sulatukset. Tästä datasta piirrettiin kuvaajat sekä kaikille liitoksille että erikseen lopetuksille, jojoliitoksille ja altaanvaihdolle. Nämä on esitetty liitteessä 1. Kuvista havaitaan, että kaikilla liitoksilla on havaittavissa, kuinka hiilipitoisuuden

lisääntyminen lisää myös pipemerkinnän yleisyyttä. Lopetuksilla ja jojoliitoksilla verranto on nouseva, mutta altaanvaihtoliitoksilla korkeahiilisillä laaduilla esiintyi hieman vähemmän pipemerkintöjä. Kuvaajien arvot ovat jakaantuneet sen verran hajanaisesti, että niistä ei voida vetää mitään ehdottoman tarkkoja päätelmiä. Keskimäärin kuitenkin voidaan sanoa korkeahiilisillä laaduilla esiintyvän enemmän pipetapauksia kuin matalahiilisillä laaduilla.



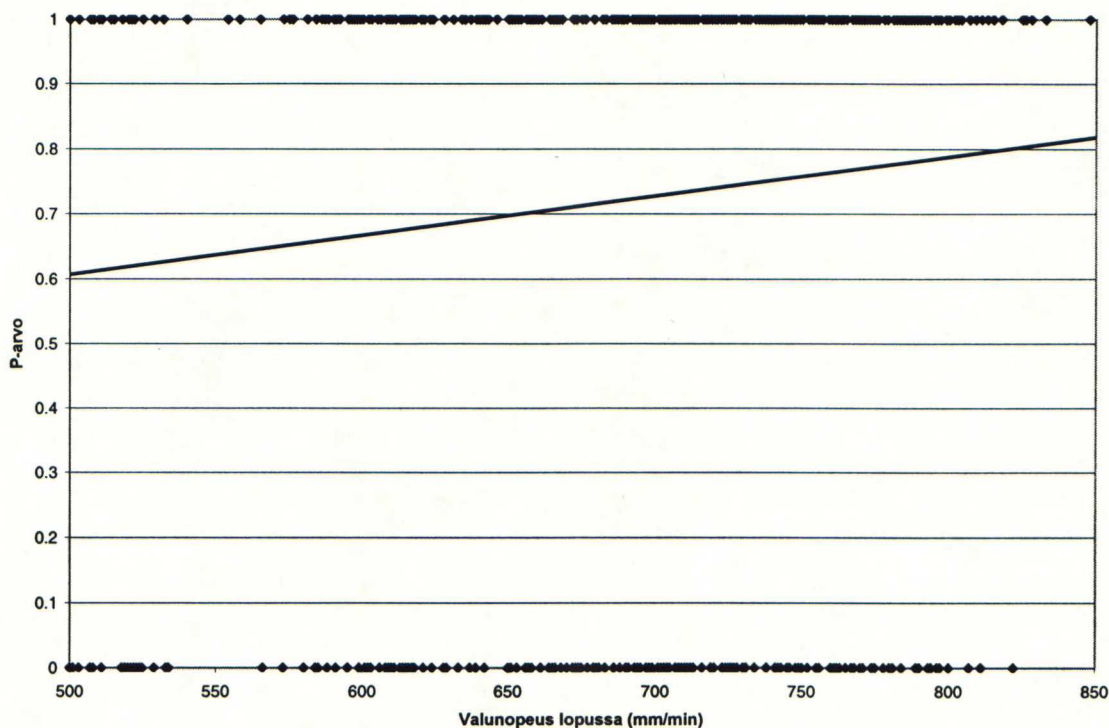
Kuva 26. Hiilipitoisuuden vaikutus pipemerkintään

Valukoneella leikattavan loppuromun pituus vaikutti tässä aineistossa selvästi pipemerkinnän yleisyyteen. Lyhyellä loppuromulla esiintyy selvästi enemmän pipemerkintöjä. Erityisesti hyvin tämä havaittiin alle 160 cm:n pituisten romutusten yhteydessä, sillä silloin ei juurikaan ollut pipemerkittömiä bloomeja. Kuvassa 27 on esitetty kuvaaja, josta nähdään kuinka romutuspituudet ovat jakaantuneet pipearvojen välille.



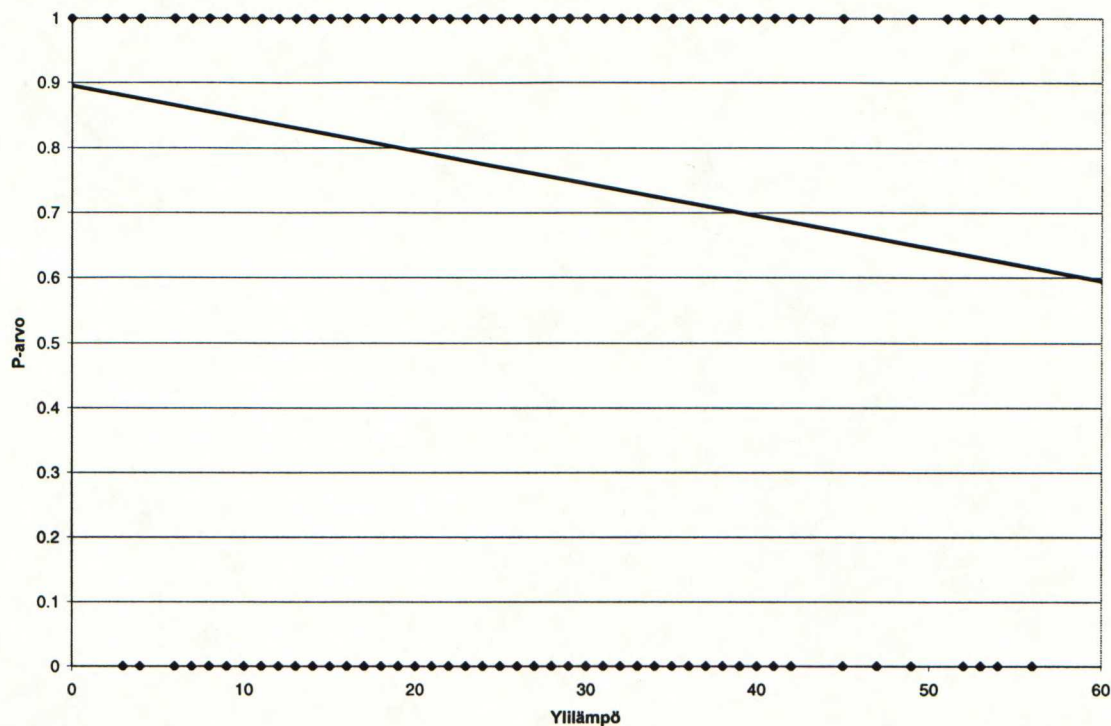
Kuva 27. Loppuromun leikkauspituuden vaikutus pipemerkintään

Teoriaosassa todettiin korkean valunopeuden valun lopussa edesauttavan voimakasta pipen muodostumista. Jotta saatiin tutkittua valunopeuksia viimeisen bloomien aikana, haettiin MTT:ltä bloomikohtainen tiedosto, josta yhdistettiin viimeisen bloomien tiedot sulatustiedostoon. Bloomitietoja on tietokannassa huomattavasti enemmän kuin sulatustietoja ja niiden tallentaminen on rajallista, joten bloomitietoja saatiin 709:n uusimman sulatuksen osalta. Näiden tietojen pohjalta voitiin piirtää verrantokuvaaja valunopeuden ja pipemerkinnän välille. Kuvasta 28 nähdään kuinka käsiteltävässä aineistossa pipemerkintöjä esiintyy enemmän suurempaa loppuvalunopeutta käytettäessä.



Kuva 28. Valunopeuden vaikutus pipemerkintään

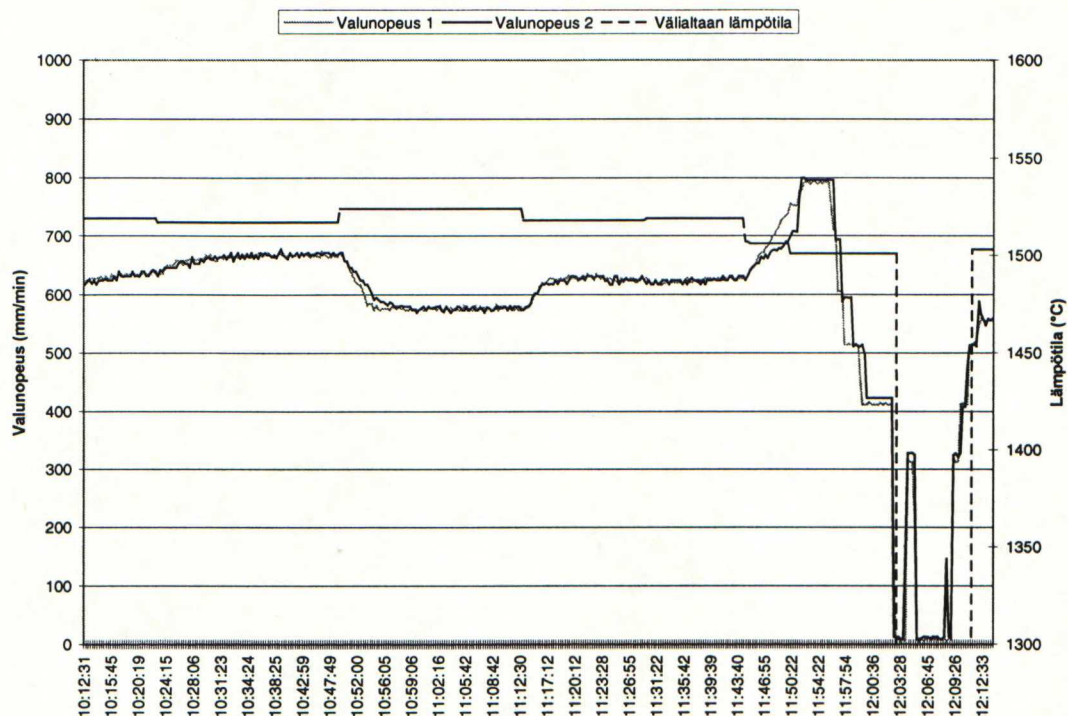
Välialtaan sulan yllälämmön pitäisi teoriaosassa käsiteltyjen tutkimusten perusteella vaikuttaa siten, että alhaisella yllälämmöllä esiintyisi vähemmän pipetapauksia kuin korkeammalla yllälämmöllä valettaessa. Tutkitussa datassa tilanne näyttää kuitenkin olevan päinvastoin, kuten kuvasta 29 voidaan hyvin havaita. Tämän selittää parhaiten Imatra Steelillä useimmilla laaduilla käytössä oleva välialtaan lämpötilasta riippuva valunopeuden ohjaus. Systeemissä nimittäin valunopeutta aletaan nostaa, mikäli välialtaan lämpötila putoaa alle tähtäyslämpötilan ($T_{\text{liq}} + 22..25^{\circ}$). Mitä enemmän lämpötila on tähtäyksen alapuolella, sitä enemmän valunopeutta nostetaan. Tämä puolestaan lisää eittämättä pipen muodostumisriskiä pidemmän sulakartion takia. Vastaavasti välialtaan lämpötilan ollessa yli tähtäyksen, hidastetaan valunopeutta vastaavassa suhteessa. Tämä puolestaan vähentää pipen muodostumista.



Kuva 29. Ylilämmön vaikutus pipemerkintään

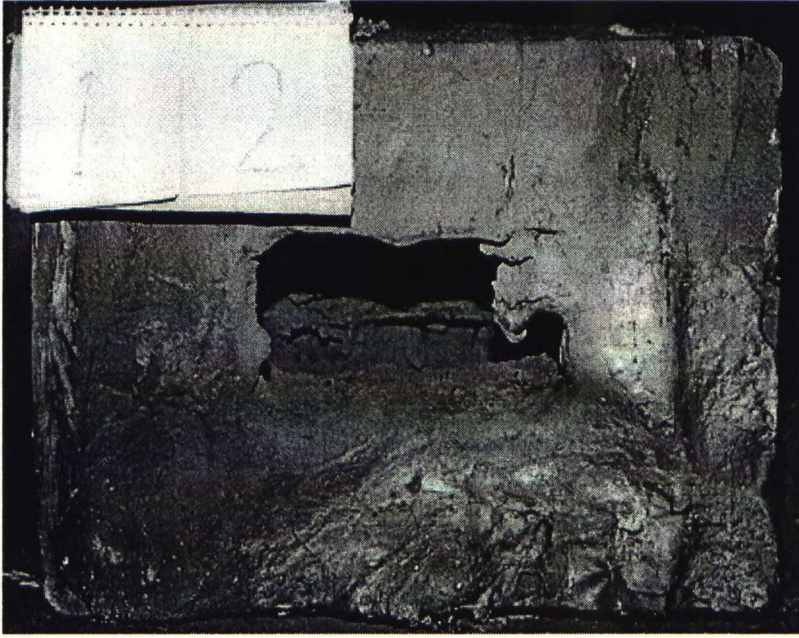
6.2 Erikoiskoe

6.10.1999 kello 10:47-12:10 suoritettun valun yhteydessä otettiin kummankin valulinjan viimeiset bloomit talteen. Valun sulatusnumero oli 323480 ja laji oli 7410 eli 50 CRV 4, jonka hiilipitoisuus oli 0.53% ja $T_{\text{liq}} - T_{\text{sol}} = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ eli kaikin puolin sopiva laatu pipen esiintymisen tutkimiselle. Muiden seosaineiden osuudet olivat seuraavat: Si:0.26%, Mn:1.02%, S:0.02%, Cr:1.10%, V:0.15% ja Al:0.02%. Likvuiduslämpötila tälle lajille on $1483\text{ }^{\circ}\text{C}$. Valun lopetus oli normaali. Loppuporrastuksen jälkeen sulakartion CASIM:lla lasketut pituudet olivat 16.36 m ja 16.43 m. Valun kulun kannalta merkittävimmin vaikuttavat tekijät eli valunopeus ja sulan lämpötila välialtaassa on esitetty kuvassa 30. Kuvasta nähdään hyvin kuinka valunopeus muuttuu välittömästi, mikäli välialtaan lämpötila on muuttunut edellisestä mittauksesta.



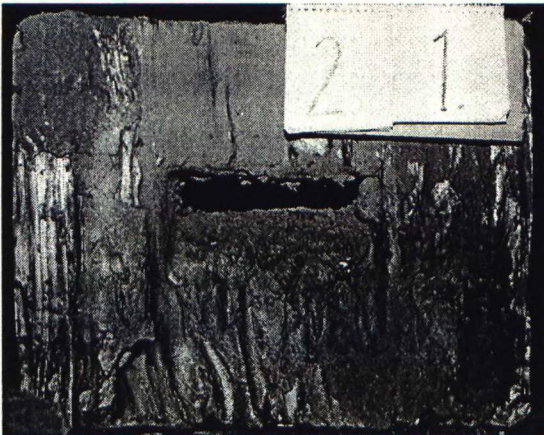
Kuva 30. Valunopeudet ja välialtasilämpötila sulatuksessa 323480

Ykköslinjalla talteenotetusta viimeisestä bloomista ei leikattu pois yhtään loppuromua, vaan sen loppupää päättyi jojoliitoskoriin. Bloomi oli 4,1 metriä pitkä ja sen lopusta polttoleikattiin kuusi 40 senttimetrin palaa, jotka numeroitiin loppupäästä alkaen. Paloja polttoleikatessa havaittiin selvästi pipen eteneminen bloomissa. Ensimmäisessä leikkauksessa pipe oli iso, noin 7 x 15 cm. Pala oli ontto kuten kuvasta 31 havaitaan. Kuva 36 tämän kappaleen lopussa, jossa on hahmoteltuna erikoiskokeen koko bloomin poikkileikkaus, esittää tarkemmin myös bloomien loppupään muodon, liitoskorin ja varsinaisen bloomien alueen välillä.

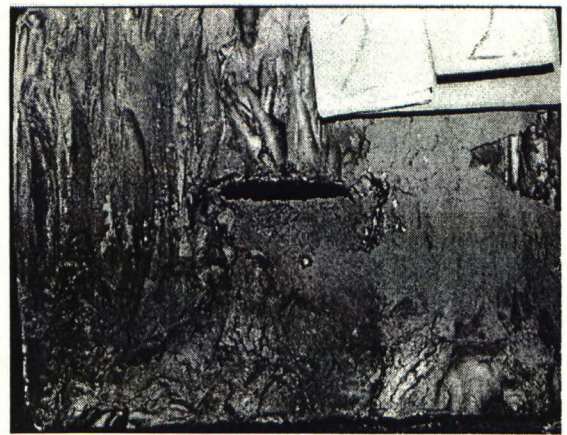


Kuva 31. Valokuva bloomipalan nro 1 loppupäästä

Toisen palan alkupään pipe oli selvästi ensimmäisessä palassa ollutta reikää pienempi ja onkin todennäköistä että polttoleikatessa paloja, ensimmäisestä palasta pääsi sulamaan osa pipen ympärillä olleesta teräksestä pois. Toisessa palassa oli kappaleen läpäisevä pipe, joka oli muodoltaan litteä ja kooltaan alkupäässä noin 4 x 10 cm ja loppupäässä 2 x 4 cm. Kuva 32 esittää palan päädyissä olleet reiät.



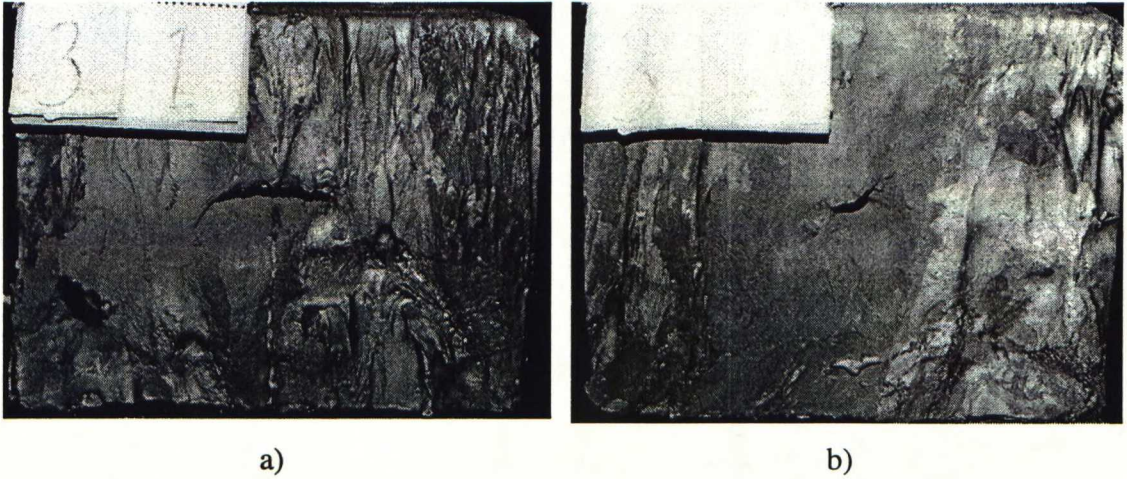
a)



b)

Kuva 32. Valokuvat bloomipalan nro 2 (40-80cm) a) alkupäästä b) loppupäästä

Kolmannen palan alkupäässä oli vielä näkyvä pipe, kuten kuvasta 33 nähdään. Pipe saattoi ikävä kyllä mennä hieman umpeen, sillä kolmatta palaa leikatessa valui loppupään leikkauksesta sulaa terästä pipeä pitkin kolmannen palan alkupäähän ja tämä on saattanut hieman tukkia pipeä. Kolmannen palan loppupäässä oli näkyvissä pieniä reikiä, samoin kuin neljännen palan alkupäässä.



Kuva 33. Valokuvat bloomipalan nro 3 (80-120cm) a) alku- ja b) loppupäästä

Neljännen palan loppupäässä reikiä oli jo selvästi vähemmän ja viidennen palan aikana pipe näytti leikkauspinnoista katsottuna loppuvan. Kaikissa näissä poikkileikkauspinnoissa näkyi kuitenkin tarkemmin tutkittuna pienempiä reiänjälkiä, vaikka selkeä pipereikä olikin jo loppunut, kuten kuvasta 34 voidaan nähdä.



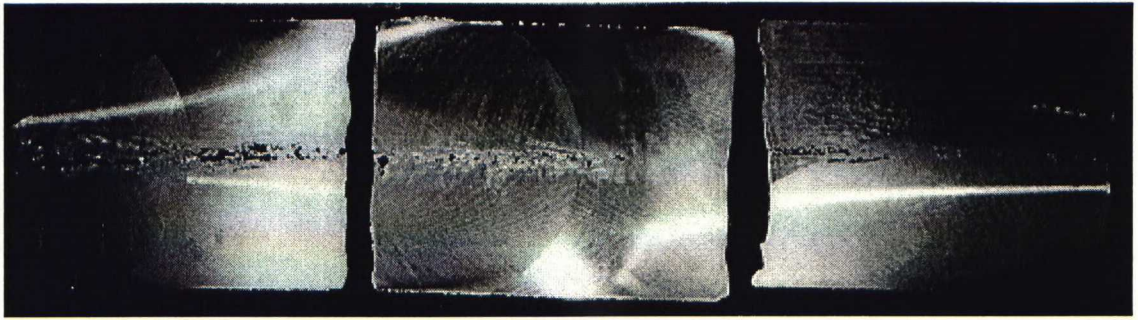
a)



b)

Kuva 34. Valokuvat bloomipalan nro 4 (120-160cm) a) alku- ja b) loppupäästä

Palat 4, 5 ja 6 sahattiin vannesahalla halki kapeamman sivun suuntaisesti eli valuasennosta katsottuna bloomien päältä. Halkaistuista paloista pipe saatiin esiin jyrsimällä pinta tasaiseksi noin pipen puoliväliin asti. Kaikista kolmesta palasta saatiin jyrsimä pipe keskikohta kohtalaisen hyvin näkyviin. Palassa 4 oli selkeä kartiomainen pipe, joka kulki palan läpi päästä toiseen. Palassa 5 pipe näytti loppuvan noin kymmenen senttiä ennen loppupäätä. Tämä johtuu luultavasti siitä, että jyrsimävaiheessa pala on ollut hieman vinossa ja toisesta reunasta on jyrsimä pois liian paljon terästä. Palan alku- ja loppupäät katsotaan pipen suunnasta eli bloomien jokorin puoleinen palan pää on alkupää ja kauempana oleva on loppupää. Palassa 6 pipe jatkui katkonaisesti, mutta jatkui kuitenkin aivan palan loppupäähän asti, minkä vuoksi koebloomista leikattiin vielä yksi pala, numero 7 ja myös se halkaistiin. Palassa 7 ei enää ollut kovin voimakasta pipeä, vaan vain pieniä huokosia noin kappaleen puoliväliin asti. Halkaistujen bloomipalojen 4, 5 ja 6 valokuvat on esitetty kuvassa 35.

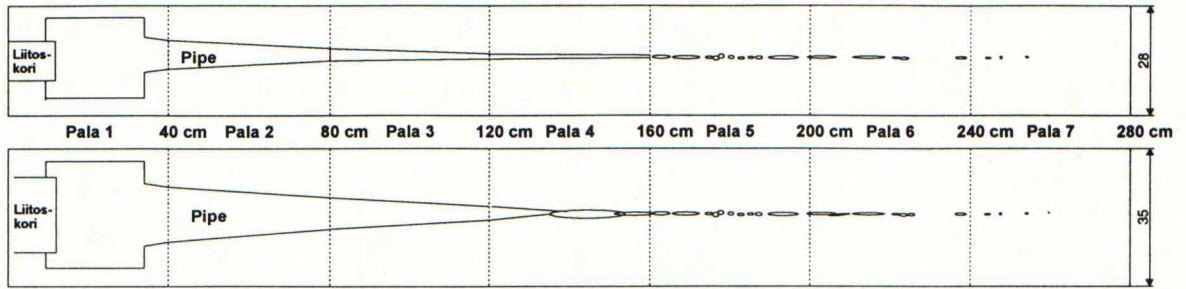


Kuva 35. Valokuva halkaistuista bloomipaloista 4, 5 ja 6 (120-240cm)

Koska pipeä esiintyi vielä kuudennessa ja seitsemännessäkin palassa eli reilusti pidemmällä kuin minkä normaali loppuromutus poistaa, tilanteen voidaan katsoa olevan huono. Yhteensä pipeä sisältävän bloomien osan pituus oli siis 270 cm, mikä on nykyisin käytetyillä romutuspituuksilla aivan liian paljon.

Palojen 4, 5, 6 ja 7 halkaisupinnoista on myös baumankuvat esitetty liitteen 2 sivuilla 1-4. Näistä kuvista voidaan havaita selvästi keskusta- ja V-suotaumat sekä ainakin paloilla 4 ja 5 bloomien keskellä oleva täysin valkoinen alue, joka tarkoittaa tyhjää eli pipeä. Seosaineiden suotautumisen esiintymistä vahvistaa myös paloja jyrittäessä syntynyt hienoinen savu. Suotautunut keskusta on erittäin kovaa, jonka vuoksi jyrsimen terät kuumenivat voimakkaasti. Kuumentuneet palat kuumensivat pinnassa ollutta öljyä. Varsinkin palaa 4 jyrittäessä terät kuumenivat todella voimakkaasti eli voidaan olettaa palassa olleen myös voimakasta suotautumista.

Pipen sijainnista bloomissa on vielä hyvä mainita, että pipe ei yleensä sijaitse täysin bloomien keskellä ylä- ja alapintojen suuntaisesti, vaan pipe on lähempänä bloomien yläpintaa. Tämä voidaan myös jossain määrin havaita kuvasta 36 sekä aikaisemmin esitetyistä kuvista erityisesti bloomipalojen 2 ja 3 polttoleikkauspintojen valokuvista. Kuvassa on ylempänä bloomien kapeamman sivun suuntaisesti halkaistu bloomi ja alempana leveämmän sivun mukaisesti hahmoteltu halkaisukuva. Jälkimmäinen on hahmoteltu bloomipaloista tehtyjen mittausten perusteella, sillä bloomi halkaistiin ainoastaan kapeamman sivun suuntaisesti.



Kuva 36. Hahmotelma erikoiskokeen ykköslinjan bloomista

Kakkoslinjan bloomien liitosromupalaan jätettiin vain 0.8 metriä vanhaa terästä ohjeen mukaisen 1.9 metrin sijaan. Liitospalaa edeltäneen bloomien pituudeksi tuli 3.905 metriä ja se siirrettiin bloomiuuniin valssausta varten lämmitettäväksi noin kahdeksi tunniksi. Valssauksessa bloomista tuli kooltaan 135 mm teelmää, joka leikattiin kolmeksi 5.4 metriä pitkäksi teelmäksi ja yhdeksi noin kolmemetriseksi teelmäksi, jotka ajettiin vanhalle arinalle merkittäviksi ja odottamaan kuljetusta teelmäntarkistukseen. Teelmien käsiultrauksessa paljastui, että ensimmäisessä teelmässä oli n. 3 metriä täysin tasalaatuista terästä ja lopputeelmässä oli aivan pientä huokoisuutta, jonka erittäin tarkka ultrauslaite kuitenkin havaitsi. Toisessa teelmässä oli samoin alussa erittäin pientä huokoisuutta, joka muuttui noin metrin päästä selväksi yhtenäisemmäksi pipeksi. Kahdessa muussa teelmässä oli molemmissa jo selvästi suurempaa sisävikaa vähintään sen verran, että ne jouduttiin kaikki romuttamaan. Teelmissä ollut pipe paheni odotetusti loppua kohti. Ensimmäinen teelmistä oltaisiin juuri ja juuri voitu käyttää ja toisesta teelmästä olisi voitu leikata romuosa pois, mutta siihen ei ruvettu koska teelmät oli merkitty koeteelmiksi, eikä niille ollut tilausta. Teelmissä ollut varsinainen romutettava pipe oli bloomikokoon muutettuna noin 250 senttimetriä. Pipe oli siis molemmilla linjoilla suurinpiirtein samaa kokoluokkaa, eikä valssaus ilmeisesti saanut pipeä vähenemään. Erikoiskokeessa käytetty teräsläatu oli tosin korkeahiillistä (0.53%) ja siis erittäin kovaa, joten se on varmasti syynä pipen säilymiselle valssauksenkin jälkeen.

6.3 Aineistokokeet

Pipetapausten esiintymiseen vaikuttavien tekijöiden tutkimista varten kerättiin tutkimusaineistoa jojoliitosten ja altaan vaihtojen viimeisistä bloomeista. Aineistoa eli viimeisten bloomien teelmiä kerättiin analysoitaviksi yhteensä kuudestatoista sulatuksesta. Sulatuksista viidessä hiilipitoisuus oli 0.15 p-%:a, viidessä 0.25 p-%:a ja kuudessa 0.40 p-%:a. Hiilipitoisuuden määrä ei tietenkään ollut aivan absoluuttisen tarkka arvo, vaan muutaman sadasosaprosentin heitto sallittiin sulatuksia valittaessa. Edellä mainituista ryhmistä käytetään tässä työssä nimityksiä 15-, 25- ja 40-hiiliset teräslajit. Nimitykset matala-, keski- ja korkeahiilinen olisivat voineet mennä sekaisin yleisen käytännön kanssa, sillä korkeahiilisistä teräksistä puhuttaessa tarkoitetaan yleensä hiilipitoisuuksiltaan luokkaa 0.6-0.8 p-%:a olevia teräslaatuja. Sulatusten tarkemmat seosainepitoisuudet tärkeimpien seosaineiden osalta on esitetty taulukossa 4, jossa teräslaadut ovat esitetty kasvavan hiilipitoisuuden mukaisessa järjestyksessä.

Taulukko 4. Aineistokokeissa esiintyneiden laatujen analyysit

Lajikoodi	Nimi	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
2723	IMATRA 520	0.130	0.30	1.30	0.035	0.035	0.20	0.016
2721	IMATRA 520	0.140	0.35	1.10	0.035	0.035		0.010
1253	IMATRA 520 S	0.155	0.20	1.18	0.040	0.040		0.010
4711	EN 351	0.160	0.25	0.80	0.025	0.035	0.70	0.016
2726	FE 52B	0.170	0.25	1.28	0.040	0.060	0.20	0.010
5503	29 MC 5 MOD	0.250	0.30	1.18	0.025	0.035	1.18	0.020
5504	27 MC 5 JV	0.250	0.26	1.18	0.025	0.035	1.08	0.019
6016	MOC 210 M	0.250	0.30	0.72	0.035	0.030	1.00	0.010
5547	SQM-1A9451-A28H	0.275	0.30	0.70	0.025	0.028	0.82	0.024
7214	38 MNSIVS 5-M	0.380	0.60	1.28	0.035	0.047	0.12	0.013
6093	ASTM A 193 B7	0.400	0.28	0.92	0.012	0.027	1.02	0.023
7205	V-2904 MOD	0.400	0.60	1.38	0.035	0.035	0.20	0.013
5077	45 M 5	0.430	0.20	1.15	0.025	0.070	0.18	0.020
7216	V-2906-00	0.435	0.25	0.80	0.035	0.050		0.015
5155	IMATRA 5	0.470	0.20	0.70	0.035	0.020		0.020

Aineiston kerääminen suoritettiin siis aivan normaalista valutuotannosta. Ainoa muutos normaliin tuotantoon verrattuna tehtiin ainoastaan karkeavalssaamon

romutusohjeissa. Normaalisti KV:llä romutetaan pipemerkintäisestä bloomista aina automaattisesti viimeinen bloomi. Aineistokokeiden sulatuksilla tätä ei luonnollisestikaan tehty, koska haluttiin saada tietoa pipen esiintymisestä. Aineistokokeessa mukana olleiden sulatusten tiedot on esitetty taulukossa 5.

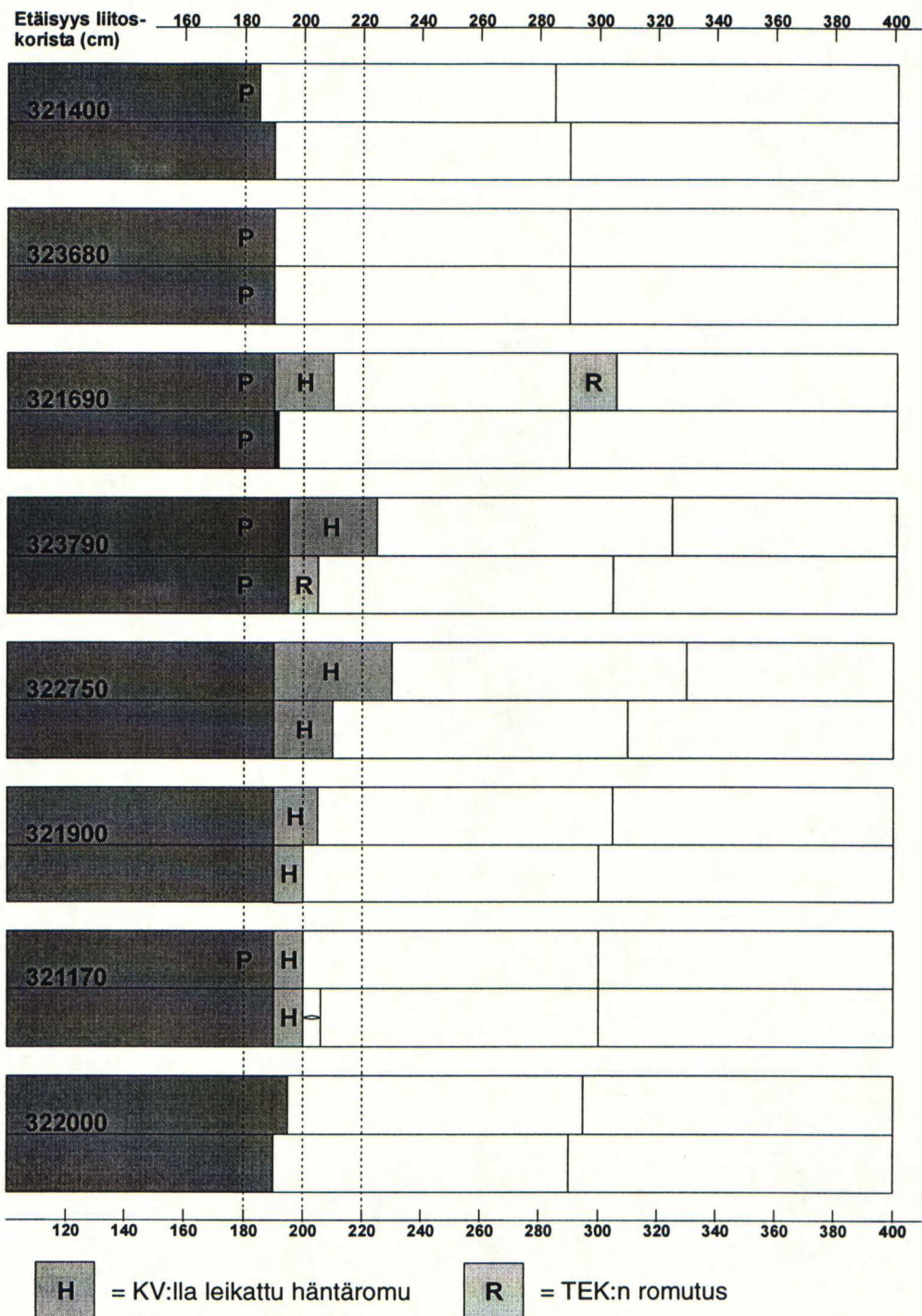
Taulukko 5. Aineistokokeiden valudata

Sulatus	Laji	C-alue	Linja	Liitos	Romu	Pipe	Valunop	Sula p	Sula l	Δ sula	T(yli)
321400	2721	15	1	3	185	1	0.69	17.11	15.66	1.45	30
321400	2721	15	2	3	190	0	0.69	17.06	15.80	1.26	30
324150	2723	15	1	4	190	0	0.71	16.84	15.75	1.09	
324150	2723	15	2	4	190	0	0.70	17.06	15.92	1.14	
324170	1253	15	1	0	300	0	0.75	17.91	17.07	0.84	23
324170	1253	15	2	0	180	0	0.74	18.00	17.57	0.43	23
324080	4711	15	1	3	200	1	0.73	18.04	16.91	1.13	28
324080	4711	15	2	3	200	0	0.72	17.96	16.18	1.78	28
322230	2726	15	1	3	190	1	0.74	18.89	16.98	1.91	27
322230	2726	15	2	3	190	0	0.72	18.94	17.09	1.85	27
321690	5503	25	1	3	195	1	0.80	19.91	19.42	0.49	18
321690	5503	25	2	3	190	1	0.80	19.82	19.24	0.58	18
323790	6016	25	1	4	195	1	0.72	18.23	17.28	0.95	27
323790	6016	25	2	4	195	1	0.73	18.19	17.27	0.92	27
321900	5547	25	1	3	190	0	0.73	18.57	16.79	1.78	41
321900	5547	25	2	3	190	0	0.73	18.57	16.87	1.70	41
322000	5547	25	1	3	195	0	0.74	18.60	16.44	2.16	
322000	5547	25	2	3	190	0	0.73	18.56	16.42	2.14	
324810	5504	25	1	3	195	1	0.73	17.51	16.83	0.68	26
324810	5504	25	2	3	195	0	0.74	17.59	16.76	0.82	26
323680	6093	40	1	4	190	1	0.70	17.90	16.04	1.86	29
323680	6093	40	2	4	190	1	0.71	17.90	16.14	1.76	29
322750	5155	40	1	3	190	0	0.61	15.73	14.65	1.08	39
322750	5155	40	2	3	190	0	0.63	15.81	14.77	1.04	39
321170	7205	40	1	4	190	1	0.73	18.88	17.20	1.68	18
321170	7205	40	2	4	190	0	0.79	18.87	17.10	1.77	18
321570	5077	40	1	3	160	1	0.75	18.36	16.38	1.98	23
321570	5077	40	2	3	190	1	0.77	18.34	16.82	1.52	23
322820	7216	40	1	4	190	1	0.70	17.76	16.64	1.12	30
322820	7216	40	2	4	190	0	0.69	17.69	16.55	1.14	30
324270	7214	40	1	3	190	0	0.73	18.29	16.65	1.64	27
324270	7214	40	2	3	190	0	0.73	18.31	16.85	1.46	27

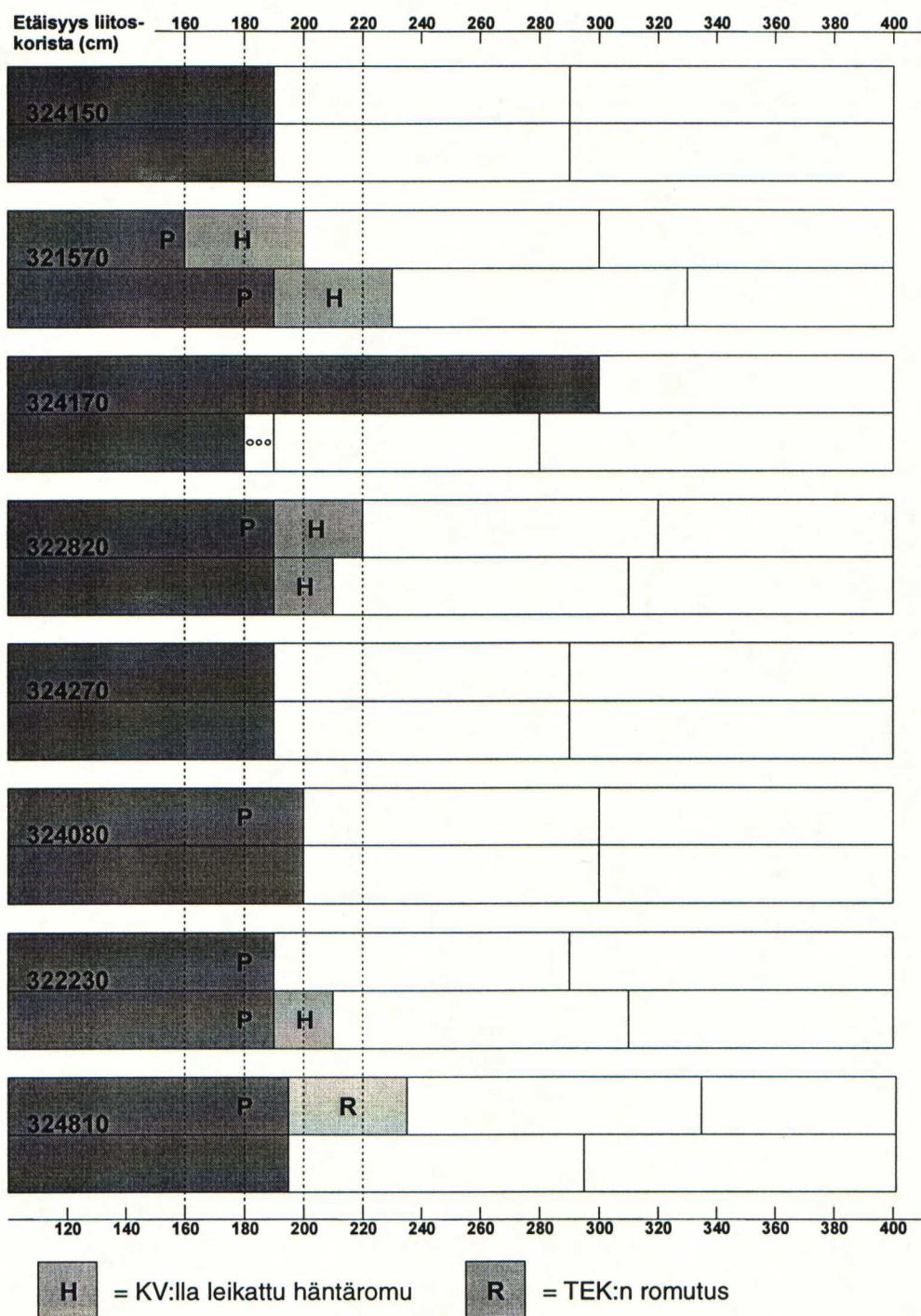
Taulukkoon on lisätty prosessitietokoneen antamien arvojen lisäksi myös CASIM:lla lasketut sulakartion pituudet sekä loppuporrastuksen aloitushetkellä (*Sula p*) että valun lopussa (*Sula l*) eli kun valunopeus on porrastuksen jälkeen pudotettu nolnaan. Lisäksi sarakkeessa Δ sula on edellämainittujen sulakartion pituuksien erotus eli se

kuinka paljon sulakartion pituus on lyhentynyt loppuporrastuksen aikana. *Valunop* tarkoittaa viimeisintä varsinaista käytettyä valunopeutta ennen loppuporrastuksen aloittamista. Taulukossa oleva sarake *Romu* tarkoittaa valukoneella suoritettua loppuromutuksen pituutta senttimetreinä. *Pipe* puolestaan merkitsee romuleikkauksen jälkeen havaittua pipeä.

Kerättyjen teelmien analysointitulokset TEK:issä sekä normaalilaitteistolla että kannettavalla ultraäänilaitteella muodostivat aineistokokeiden rungon edellä esitetyn valudatan ja CASIM:lla mallinnettujen sulakartion pituuksien lisäksi. Ultraäänitarkastelun tuloksien perusteella hahmoteltiin kuvat. Niistä nähdään tehdyt romuleikkaukset valukoneella ja karkeavalssaamalla. Lisäksi kuviin on merkitty havaitut pipet ja pipen takia tehdyt romuleikkaukset TEK:ssä. Hahmotelmat on esitetty kuvissa 37 ja 38.



Kuva 37. Aineistokokeen bloomit, osa 1



Kuva 38. Aineistokokeen bloomit, osa 2

Kuvien tärkein anti ovat teelmistä löytyneen pipen takia TEK:issä tehdyt romutukset. Kuvien vasemmassa reunassa oleva tummanharmaa osa tarkoittaa valukoneella leikattua liitosromua. Joissain viimeisissä teelmissä havaittiin lopussa pientä huokoisuutta, joka ei kuitenkaan ollut niin vakavaa, että sitä oli ollut tarpeellista

romuttaa. Nämä on merkitty pienillä palloilla teelmän loppuun. Kuvissa esitetyt romutukset ja pipen löytymisten pituudet ovat bloomikoossa. Teelmät on piirretty laatikoina ja niiden pituudet vastaavat todellisia teelmäpituuksia, tosin bloomien poikkileikkauskokoon muutettuna. Poikkeuksena ovat useimmat kuvissa oikean puoleisimpina olevat teelmät, joiden pituudet on tasattu kuvan reunaan puhtaasti käytännön syistä.

15-hiilisten sulatusten joukossa ei jouduttu tekemään yhtään ylimää räisiä romutuksia TEK:n tarkastusten jälkeen. P-merkintä oli neljässä bloomissa kymmenestä, tosin yhdestäkään pipemerkintäisen bloomien teelmästä ei TEK:ssä löydetty minkäänlaista pipeä. Sulatuksen 324170 ykköslinjan bloomista leikattiin valukoneella poikkeuksellisen pitkä, 300 sentin liitosromu. Saman sulatuksen kakkoslinjan bloomien liitosromu oli normaalin, 190 sentin pituinen. Kakkoslinjan viimeisen teelmän lopussa havaittiin aivan pientä keskustahuokoisuutta, jota ei tarvinnut poistaa leikkaamalla. Mitään muuta normaalista poikkeavaa ei 15-hiilisten sulatusten parista löytynyt. Muutamassa pipemerkintäisessä bloomissa oli lopetushetkellä kohtalaisen pitkä, noin 17 metrin sulakartio. Koska näistäkään ei saatu mitään pipehavaintoja ultraäänitutkimuksissa, on syytä epäillä että 15-hiilisillä pipe saattaa painua valssauksessa umpeen. Erityisesti 15-hiilisten laatuja pehmeys puoltaa tätä seikkaa. Tutkimuksissa ei yleensä kään ole löydetty pahoja vikoja matalahiilististä laaduista.

25-hiilisten sulatusten ryhmästä löytyivät ainoat varsinaiset pipen takia tehdyt romutukset. Kymmenessä bloomissa ei kuitenkaan ollut P-merkintää kuin viidessä. Ainoat P-merkittömät bloomit olivat laadun 5547-sulatuksia, eli vakionopeudella valettavaa laatua. Vakavin pipetapaus löytyi sulatuksen 321690 ykköslinjan bloomista, jonka viimeisen teelmän alussa oli noin puolen metrin pipe. Muu teelmä oli hyvälaatuinen, joten pipeosa leikattiin pois ja muu teelmä hyväksyttiin. Teelmän lopusta oltiin leikattu aikaisemmin noin metri häntäromua KV:llä. Saman sulatuksen kakkoslinjan bloomissa oli myös P-merkintä, mutta sen lopusta ei löytynyt kuin muutaman sentin mittainen pipe, joka saattoi tosin olla leikkausrepeämä. Sulatuksen bloomien sulakartion pituudet olivat todella pitkät valun lopussa, 19.42 ja 19.24 metriä, joten ei ihme että pipeä havaittiin.

Sulatuksessa 323790 oli molemmilla bloomeilla tehty P-merkintä. Ykköslinjan viimeisen teelmän kohdalla kävi ikävästi, sillä se katosi jäljettömiin ollessaan matkalla TEK:iin. Linjan muista teelmistä ei löydetty merkkiä pipestä eli voidaan sanoa pipen päätyneen viimeiseen kaksimetrisen teelmään. Kakkoslinjan viimeisen teelmän lopusta jouduttiinkin leikkaamaan pois 80 cm pipeä. Sulakartion pituudet sulatuksen bloomeille olivat lopetushetkellä 17.28 ja 17.27 metriä. Pipen voidaan sanoa olleen odotettavissa, sillä sulakartion pituudet olivat aika pitkiä.

25-hiilisten pisin piperomutus tehtiin sulatuksen 324810 ykköslinjan kohdalla. Linjalla oli tehty pipehavainto, mutta valudatan perusteella viimeisen teelmän lopussa ollut kaksimetrisen pipe oli kieltämättä yllätys. Valunopeus ei noussut kovin korkealle missään valuvaiheessa ja sulakartion pituus, 16.83 metriä oli kaikkiin aineistokokeen sulatuksiin verrattuna keskitasoa. Kakkoslinjalla sulakartion pituus lopussa oli 16.76 metriä.

Kahdessa muussa 25-hiilisessä sulatuksessa ei ollut P-merkintää, eikä pipestä saatu mitään havaintoja ultraäänitutkimuksissakaan. Tämän ryhmän bloomien kohdalla valukoneella tehty P-merkintä piti paikkansa erittäin hyvin. Neljässä merkissä viidestä löydettiin myös viimeisestä teelmästä romutettavaa pipeä ja viidennessäkin tapauksessa pipeä olisi luultavasti löydetty, ellei viimeinen teelmä olisi kadonnut. Romutukseen johtaneen pipen sisältäneissä bloomeissa kolmessa tapauksessa neljästä voitiin liittää pitkän sulakartion esiintyminen. Sulakartioiden pituuksien keskiarvo virheettömille bloomeille oli 16.76 metriä, kun romutusta vaatineiden vastaava keskiarvo oli 18.19 metriä.

40-hiilisten sulatusten joukosta kuudessa bloomissa kahdestatoista oli P-merkintä. Kun 15- ja 25-hiilisillä oli aineiston mukaan tullut ainoastaan yksi altaanvaihtotapaus kumpaankin, oli niitä 40-hiilisten joukossa peräti neljä kappaletta kuudesta. Kappaleessa 6.1 esitetyn taulukon 3 perusteella tiedettiin altaanvaihtojen yhteydessä esiintyvän suhteessa enemmän pipe-havaintoja kuin muilla liitostavoilla. Lisäksi tiedettiin korkeahiilisillä teräslaaduilla esiintyvän pidempää puuroaluetta ja siten

herkkyyttä pipen muodostumiselle. Näiden lähtökohtien perusteella odotettiin aineistossa esiintyvän pahoja pipetapauksia. Toisin kuitenkin kävi.

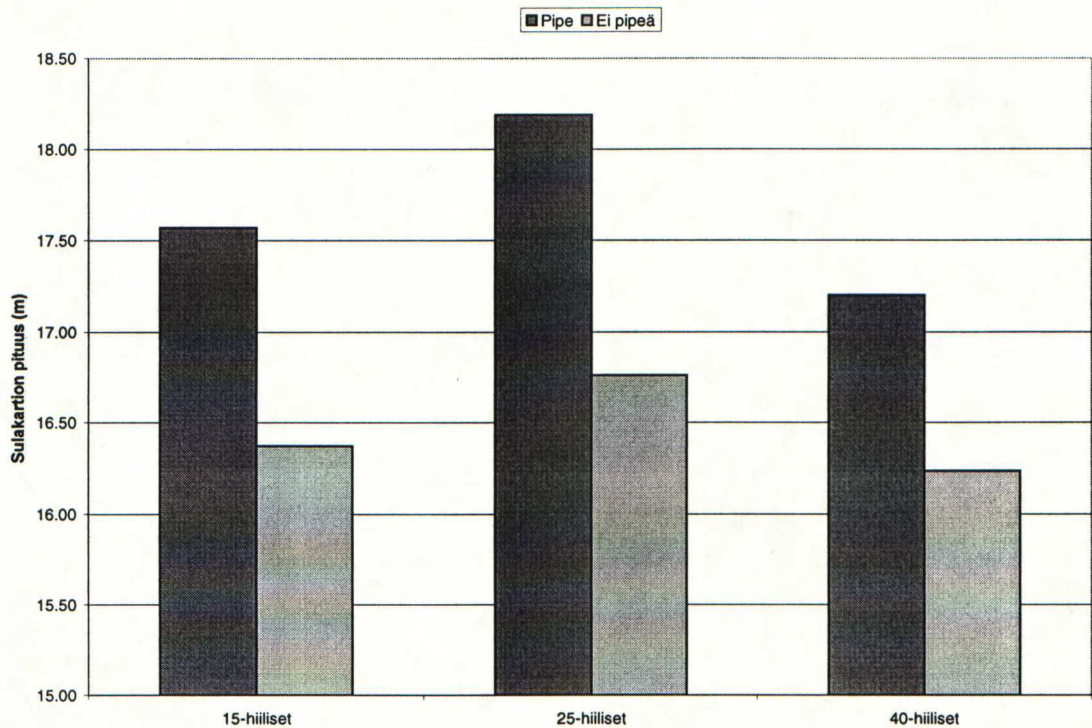
Pipemerkintäisistä bloomeista ei yhdessäkään havaittu ultraäänitutkimuksissa minkäänlaista pipeä. Sulatuksella 321570 jouduttiin KV:llä tekemään kahden metrin häntäromutus, joiden jälkeen romutukset olivat bloomimitassa 200 ja 230 senttiä. Nämä eivät kuitenkaan ole merkittävästi ohjearvoa 190 senttiä pidempia. Sulatuksen 321170 kohdalla KV:llä leikattiin lopusta noin metrin häntäromut molemmille linjoille. Vaikka ykköslinjan bloomilla oli P-merkinnästä, ei viimeisestä teelmästä löytynyt tarkastuksessa mitään. Kakkoslinjalla oli lopussa pientä keskustahuokoisuutta, mutta se ei johtanut toimenpiteisiin. Tällä sulatuksella oli 40-hiilisten pisimmät sulakartion pituudet valun lopussa, 17.20 ja 17.10 metriä.

Sulatuksen 322820 ykköslinjalla oli P-merkintä. Linjan lopusta jouduttiin leikkamaan KV:lla kaksi metriä häntäromuksi. Tämän jälkeen ei viimeisestä teelmästä löytynyt pipeä.

40-hiilisten sulatusten joukossa ei siis jouduttu tekemään yhtään romutusta ultraäänitarkastuksen jälkeen. Yksi selitys löytyy varmasti sulakartioiden keskimääräisestä pituudesta, joka oli valun lopussa vain 16.32 metriä. Ainoastaan yhdessä P-merkinnästä kuudesta löydettiin edes pientä huokoisuutta viimeisen teelmän lopussa. Tämän perusteella voidaan P-merkinnän toimivuutta hieman kyseenalaistaa.

Koko aineistokokeiden lopputuloksena kaiken kaikkiaan 32:sta bloomista löydettiin kolme varsinaista pipeä ja kolme pientä sekundääripipeä. Pienen sekundääripipen löytäminen ei tosin johtanut kertaakaan romutukseen. Näiden kuuden bloomien kohdalla sulakartion pituuden keskiarvo valun lopetusporrastuksen loputtua oli huomattavan pitkä, peräti 17.91. Pipettömien bloomien kohdalla sama keskiarvo oli 16.41 metriä eli erotusta tulee huimat puolitoista metriä.

Kuvassa 39 nähdään havainnollisesti sulakartioiden pituuksien keskiarvot kullakin hiilialueella. Kuvassa on eroteltu bloomit niihin joista löytyi jonkinasteista pipeä ja niihin joista ei löydetty ultraäänitutkimuksessa mitään sisävikaa.



Kuva 39. Keskimääräiset sulakartion pituudet valun lopetushetkellä

Sulakartion pituuteen vaikuttaa ennenkaikkea käytetty valunopeus. Tämän vuoksi onkin selvää, että valettaessa niitä bloomeja, joista löydettiin vakavimmat pipet olivat myös valunopeudet olleet korkeat. Valunopeudet koko valun aikana voi kunkin sulatuksen kohdalla nähdä liitteessä 3 esitetyissä valukäyrissä, joissa on myös näkyvillä sulakartion pituudet kummallekin valulinjalle.

Välialtaan sulan yllilämpö valun lopussa oli pipetapausten kohdalla yleensä aika alhainen. Keskimäärin kaikkien sulatusten kohdalla yllilämpö oli 27.57 °C. Pipetapausten kohdalla keskiarvo yllilämmölle oli 21.67 °C ja pipettömien 29.18 °C. Näistä arvoista nähdään, että pipetapausten kohdalla yllilämpö on yleensä keskiarvoa alhaisempi. Kuten jo aikaisemmin on mainittu, Imatralla monet teräslaadut valetaan

siten, että valunopeus on kääntäen verrannollinen välialtaan lämpötilaan. Tämä aiheuttaa tapahtumaketjun, jossa matalan yllälämmön vuoksi valunopeutta joudutaan nostamaan. Korkeampi valunopeus pidentää sulakartiota. Kaikki nämä tekijät näyttävät siis johtavan samaan asiaan eli pipen esiintymisen suurempaan todennäköisyyteen.

Liitospalaan jätetyn loppuromun pituus pyrittiin tässä tutkimuksessa pitämään vakiona. Tämän vuoksi loppuromun pituuksista ei voida vetää mitään johtopäätöksiä aineistokokeiden tulosten osalta. Yleisesti kuitenkin on loogista, että mitä pidempi loppuromutus sulatuksen lopusta tehdään, niin sitä vähemmän pipeä pitäisi esiintyä.

Aineistokokeiden jälkeen sattui tulemaan vielä yksi pikaseis-lopetus, jonka viimeisen bloomien teelmät ohjattiin samalle reitille kuin aineistokokeiden teelmätkin. Sulatuksen numero oli 325100 ja laatu oli 4542 eli 805H22, jonka hiilipitoisuus oli 0.22% eli sitä voidaan verrata 25-hiiliseen aineistokoeryhmään. Sulatuksesta ei ikävä kyllä ole tallella tarkempaa dataa valunopeuksien tai valulämpötilojen osalta, sillä MTT-tietokannassa tiedot olivat ehtineet pyyhkiytyä pois.

Teelmät analysoitiin normaaliin tapaan TEK:ssä, minkä lisäksi niille suoritettiin tarkempi ultraäänitutkimus kannettavalla laitteella. Ykköslinjalta leikatun loppuromun pituus oli 2.3 metriä ja kakkoslinjan 2.9 metriä. Tämän lisäksi pipeä löytyi ykköslinjan teelmistä bloomikokoon muutettuna 2.6 metriä ja kakkoslinjalta 1.8 metriä. Yhteensä siis pipen pituudet bloomeissa olivat 4.9 ja 4.7 metriä. Tavalliseen valun lopetukseen verrattuna pipeä oli pikaseisbloomeissa melkein kaksi metriä enemmän.

6.4 Jatkokokeet

Aineistokokeiden tulosten ja aikaisemman tiedon pohjalta lähdettiin kokeilemaan erilaisten parannusten tekemistä valun lopetuksessa ja erityisesti lopetusporrastuksessa. Valun lopetuksessa katsottiin olevan parhaat mahdollisuudet saada vähennettyä pipen muodostumista. Tavoitteena oli saada lyhennettyä

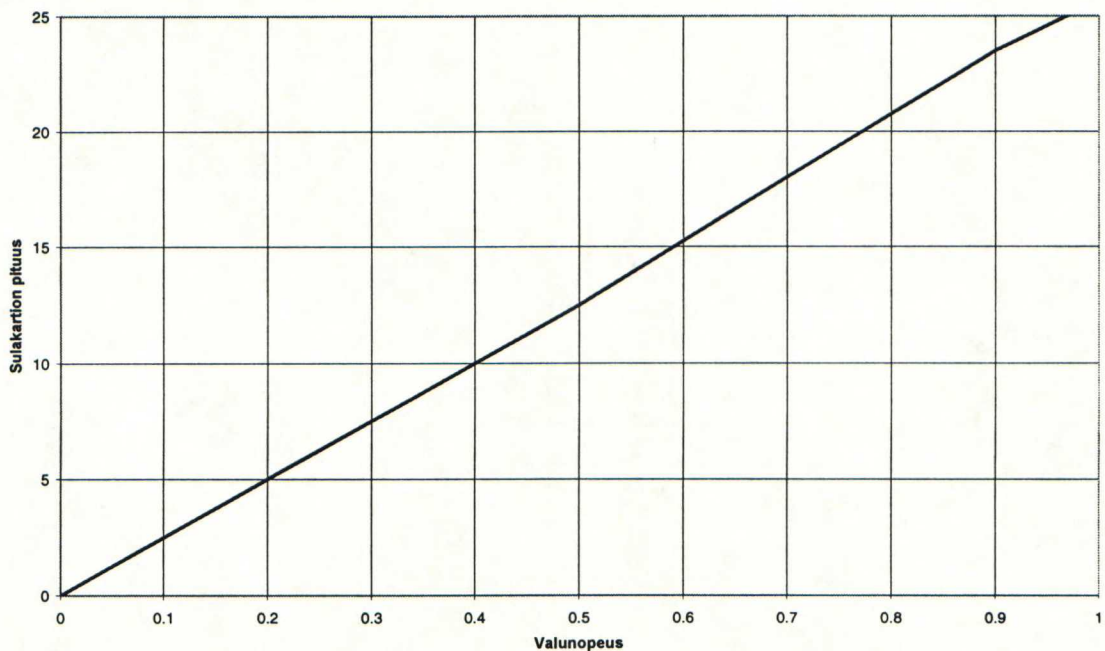
sulakartiota mahdollisimman lyhyeksi lopetusporrastuksen avulla. Kaikkein tärkeintä lopetusporrastuksessa on valaa mahdollisimman pienellä valunopeudella mahdollisimman pitkään. Hidastaminen kannattaisi vähäisemmän pipen muodostumisen saavuttamiseksi aloittaa jo ennen sulan loppumista senkasta ja siis ennen varsinaista loppuporrastusta. Koko ajan on kuitenkin muistettava että valukonetta ei kannata liian pitkään käyttää matalalla valunopeudella. Tällöin nimittäin on vaarana menettää alhaisemmalla valunopeudella ja loppuporrastuksella saavutettu vähäisen pipen hyöty valettujen terästönien vähentyessä. Kenties paras tilanne pipen kannalta näytti aineistokokeiden perusteella olevan silloin kun valunopeus on ollut tasainen ja suhteellisen alhainen (n. 0.65 m/min). Vaikka valunopeutta nostettaisiin valun lopussa 5-10 minuutiksi hyvinkin korkealle, ei se ehdi pidentää sulakartiota kovin paljoa. Tilanne on huomattavasti hankalampi, jos valunopeus on ollut korkea koko valun ajan.

Myös jäähdytykseen valun lopetuksessa on tärkeää kiinnittää huomiota. Erityisesti siinä vaiheessa, kun liitostapauksessa tai lopetuksessa valunopeus on nollassa, voitaisiin jäähdytystä vähentää. Ideana tässä on se, ettei paikallaan olevaa aihiota jäähdytetä liikaa kokillin alapuolisella jäähdytysvyöhykkeellä ja mahdollisesti samalla aiheuteta sulakartioon sille kohtaa siltoja, jotka estävän sulan virtaamisen ja näin muodostavat sekundääripipejä. Jäähdytysvesimäärää ei voi enää pienentää, sillä tukirullilla on valunopeuden ollessa nollassa oltava minimivesijäähdytys, josta ei voida enää pudottaa tai muuten ovat rullat vaarassa. Tämän vuoksi ainoa mahdollisuus yrittää vähentää jäähdytystä on ottaa paineilmajäähdytys pois päältä, kun valunopeus on liitosta tehdessä nollassa. Nykyään näin pyritään tekemään, kun valu on ollut pysähdyksissä vähintään 7-8 minuuttia. Paineilmojen ottamista pois kokeiltiin jälkimmäisessä porrastuskokeessa.

CASIM:lla tehtiin muutamalle aineistokokeiden prosessidatan avulla mallit, joiden avulla piirrettiin sulakartion pituus samaan kuvaan valunopeuden kanssa. Näistä käyristä havaittiin valunopeuden lähtöarvon ennen loppuporrastuksen aloittamista olevan tärkein sulakartion lopetuspituuteen vaikuttava tekijä. Myös

loppuporrastuksen kesto kaikkein hitaimmalla valunopeudessa vaikuttaa suuresti sulakartion pituuteen.

Monesti on myös vaikea ymmärtää kuinka hitaasti sulakartion kärki liikkuu valunopeutta muutettaessa. Esimerkiksi valunopeuden ollessa 0.7 m/min valunopeuden pudotus 0.6 m/min:iin lyhentää sulakartion pituutta vain kymmenen senttimetriä minuutissa. Vastaavasti pudotettaessa samasta lähtönopeudesta valunopeus 0.5 m/min:iin, sulakartio lyhenee samassa ajassa kaksinkertaisen matkan, kaksikymmentä senttimetriä. Tämä vahvistaa aiemmin esitetyn ajatuksen siitä, että kaikkein tärkein tekijä loppuporrastuksessa on se aika, minkä verran valetaan mahdollisimman hitaalla nopeudella. Kuva 40 vahvistaa valunopeuden vaikutuksen sulakartion pituuteen.



Kuva 40. CASIM:lla laskettu sulakartion pituus valunopeuden funktiona

On hyvä muistaa että jähmettyminen tapahtuu aina vakionopeudella, valunopeudesta riippumatta, joten sulakartio liikkuu aina valunopeuksien erotuksen antamalla nopeudella, eikä minkäänlaista hitausmomenttitekijää ole olemassa.

Nykyisin käytössä olevan ohjeen mukaan lopetusporrastus aloitetaan pudottamalla valunopeus 0.6 m/min:ssa siinä vaiheessa, kun välialtaassa on enää 6 tonnia jäljellä. 5 tonnin kohdalla valunopeus pudotetaan 0.5 m/min:ssa ja 4 tonnin kohdalla 0.4 m/min:ssa. Mikäli valunopeus on ollut reilusti yli 0.7 m/min:n saatetaan tehdä yksi hieman lyhyempi porrastus 0.7 m/min:n kohdalla. Nykyisen ohjeen mukaisen porrastuksen päätyttyä sulakartion pituus on 15.97 metriä lähtönopeuden ollessa vakio 0.7 m/min eli sulakartion lähtöpituus on 18 metriä. Porrastus kestää noin 7.5 minuuttia. CASIM:lla kokeiltujen erilaisten porrastusvaihtoehtojen perusteella voidaan sanoa nykykäytännön olevan hyvä kompromissi porrastuksen keston ja sulakartion lyhenemisen välillä. Tosin tätä hyvää menetelmääkin kannatti yrittää parantaa, sillä sulakartion pituuden voidaan sanoa aineistokokeiden perusteella olevan erittäin merkittävä tekijä pipen muodostumisen kannalta.

Jatkokokeissa käytettäväksi lopetusporrastukseksi päädyttiin seuraavaan vaihtoehtoon. Valunopeuden hidastaminen aloitetaan siten, että 7 väliallastonnin kohdalla valunopeus olisi saatu pudotettua 0.5 m/min:iin. Mikäli lähtövalunopeus on hyvin suuri, joudutaan hidastaminen aloittamaan suhteessa aikaisemmin, sillä ei ole mahdollista eikä järkevää pudottaa valunopeutta suoraan esimerkiksi 0.8 m/min:sta 0.5 m/min:iin. Ensimmäistä porrastusnopeutta valetaan kahden tonnin ajan ja 5 väliallastonnin kohdalla valunopeus pudotetaan 0.4 m/min:iin. Tällä nopeudella jatketaan loppuun asti. On huomattava että valun lopussa välialtaaseen jää aina ns. väliallaskolla, jossa on mm. kuonaa, peiteaineita ja jonkin verran terästä. Altaanvaihdolla väliallaskolla on keskimäärin 1.5-1.8 tonnia. Uusi porrastus kestää hieman kauemmin kuin nykyinen eli noin 9.3 minuuttia. 0.7 m/min lähtönopeudella porrastus lyhentää sulakartion 15.2 metriseksi.

Pipen vähentämiseksi kannattaisi loppuporrastuksen viimeisessä vaiheessa pudottaa valunopeutta mahdollisimman alas, jopa 0.3 m/min:iin, mutta tällä hetkellä kokillisekoitin menee pois päältä alle 0.4 m/min valunopeudella valettaessa. Tämän vuoksi nykyisellä ohjeistuksella lopetusporrastusta tehtäessä ei valunopeutta pudoteta edes 0.4 m/min:iin, vaan alin käytetty nopeus on noin 0.41-0.43 m/min. Mikäli kokeissa käytetyssä porrastuksessa oltaisiin voitu hidastaa 0.4 m/min:n sijasta 0.3

m/min:iin, olisi sulakartio lyhentynyt samaa lähtönopeutta käytettäessä peräti 14.55 metriseksi eli lähes puolitoista metriä nykyistä ohjetta lyhyemmäksi.

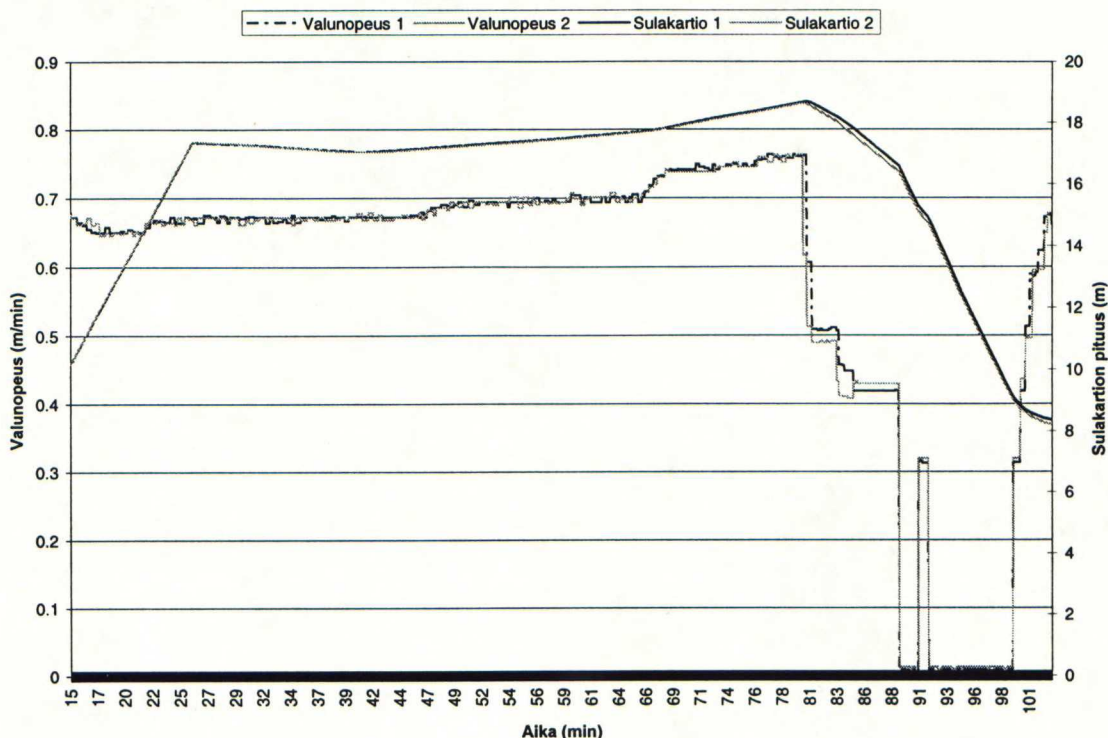
Jossain vaiheessa oli ajatuksena tehdä ykkös- ja kakkoslinjoille erilaiset loppuporrastukset, mutta se katsottiin huonoksi vaihtoehdoksi. Syynä oli sulan määrän kuluminen eri tavalla kuin tilanteessa, jossa molemmilla linjoilla tehdään samanlainen loppuporrastus.

Tehtyjen jatkokokeiden tavoitteena oli se, että lyhyempi sulakartio ei aiheuttaisi yhtä vakavaa pipeä kuin nykyisellä menetelmällä saatetaan aiheuttaa. Sulakartion pituuden vaikutus pipen muodostumisen todennäköisyydelle tuli hyvin esille aineistokokeissa. Jotta pipeä saataisiin parhaiten tutkittua näissä jatkokokeissa, leikattiin valukoneella normaalia lyhyemmät liitospalan loppuromut.

Ensimmäinen loppuporrastuskoe tehtiin 25.11. Se suoritettiin normaalin tuotannon aikana altaanvaihtoliitoksen yhteydessä. Sulatusnumero oli 328700 ja lajina oli 7206 eli V-2906-90 MOD S. Lajin hiilipitoisuus on 0.435 eli sitä voidaan verrata aineistokokeiden 40-hiilisiin laatuihin. Muu seostus on: Si 0.25%, Mn 0.80%, P 0.035%, S 0.065%, V 0.08% ja Al 0.013%. Seostuksesta on erityisesti huomattava rikin suuri määrä, joka tunnetusti huonontaa valettavuutta erityisen valun loppuvaiheissa mikäli valulämpötila on pudonnut paljonkin tähtäyksen alle. Valunopeuden muutokset ja sulakartion pituudet molemmille linjoille on esitetty kuvassa 41. Lisäksi taulukkoon 6 on kerätty kootusti molempien jatkokokeiden valutietoja.

Taulukko 6. Jatkokokeiden valudata

Sulatus	Laji	C-alue	Linja	Liitos	Romu	Pipe	Valunop	Sula p	Sula l	T(yli)
328700	7206	40	1	4	160	1	0.76	18.686	16.56	20
328700	7206	40	2	4	165	1	0.76	18.636	16.36	20
327900	5504	25	1	4	160	1	0.79	19.923	18.13	17
327900	5504	25	2	4	160	1	0.80	19.924	18.11	17



Kuva 41. Ensimmäisen porrastuskokeen valunopeudet ja sulakartion pituudet

Kokeen aikana senkan valuputki kuroi kiinni kaksi kertaa ennen kuin annettiin periksi ja senkkaan jääneet noin kahdeksan tonnia terästä palautettiin valokaariuunille. Valunopeuden hidastaminen aloitettiin kakkoslinjalla, kun välialtaassa oli jäljellä 8 tonnia terästä. Ykköslinjalla hidastaminen aloitettiin hieman myöhemmin eli noin 7.5 tonnin kohdalla. Hidastaminen 0.5 m/min:iin kesti yllättävän kauan, vaikka nopeutta laskettiin välillä hyvinkin voimakkaasti. Välialtaassa oli jäljellä noin 6.7 tonnia, kun valunopeus oli molemmilla linjoilla saatu pudotettua 0.5 m/min:iin. Tällä nopeudella jatkettiin kunnes jäljellä oli enää 5 tonnia, jolloin valunopeus pudotettiin noin 0.42 m/min:iin. Kun välialtaassa oli jäljellä enää 1.8 tonnia, linjat pysäytettiin.

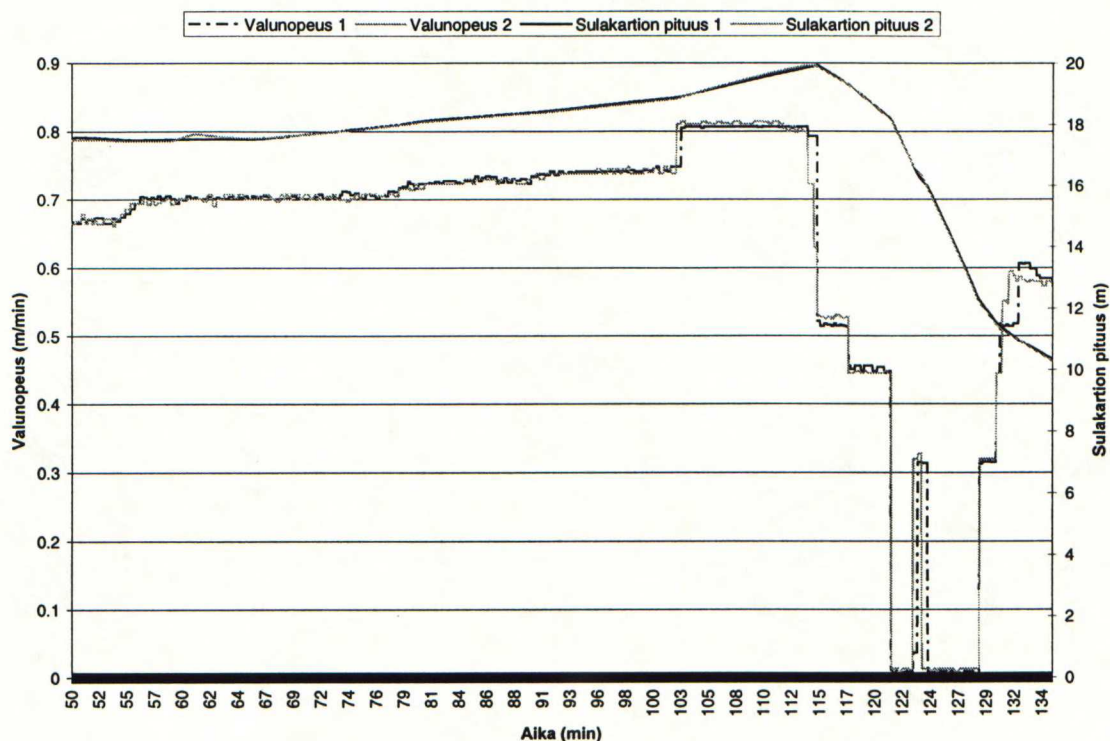
Porrastus kesti noin seitsemän minuuttia ensimmäisen porrastusnopeuden eli 0.5 m/min:iin saavuttamisesta lopetukseen. Porrastuksen kesto oli siis käytännössä lyhyempi kuin teoriassa sen oli laskettu olevan. Suurin syy tähän oli se, että välialtaaseen jäi lopuksi 1.8 tonnia kollaa. Keskimäärin väliallaskolla on 1.5-1.8

tonnia sekä jojoliitoksilla että altaanvaihdolla. Tämän tiedon perusteella lopetus onnistui senkan kuromista lukuunottamatta hyvin. Muita syitä lopetusporrastuksen laskettua lyhyempään keston käytännössä se, että aivan 0.4 m/min:ssa valunopeutta ei voida käytännössä valaa. Lisäksi valunopeuden pudottaminen porrastusnopeuteen kestää oman aikansa.

Linjojen loppuromujen pituudet valukoneella olivat 160 ja 165 cm. Molempien linjojen bloomeille tuli myös P-merkintä valukoneella. Valssatut teelmät menivät TEK:in analysoitaviksi aivan kuten aikaisemmilla kokeillakin. Teelmistä ei löydetty mitään romutettavaa eikä varsinaista pipeäkään kummankaan linjan viimeisistä teelmistä. Viimeisten teelmien lopusta saatiin jotain aivan pientä kaikua ultraäänilaitteella, mutta se oli todella vähäistä.

Ensimmäisen kokeen tulokset olivat siis todella positiivisia. Tämän vuoksi haluttiin kokeilla samaa porrastusta 25-hiilisen laadun kohdalla. Samalla kokeiltaisiin toisella linjalla jäähdytyspaineilman ottamista pois siinä vaiheessa, kun valunopeus on liitoksentekoajaksi pudotettu nolleen.

Toinen loppuporrastuskoe tehtiin 1.12. kello 6:45-8:00. Se tapahtui myös normaalin tuotannon aikana ja altaanvaihtoliitokselle. Sulatus oli 327900 ja laatu 5504 eli 27 MC 5 JV, jonka hiilipitoisuus on 0.25% eli se sopi erittäin hyvin 25-hiiliseen ryhmään. Linjojen valunopeudet ja niille lasketut sulakartion pituudet nähdään kuvasta 42.



Kuva 42. Valunopeudet ja sulakartion pituudet II-porrastuskokeessa

Lajin likviduslämpötila on 1507 °C ja tähtäys 1531 °C. Väliallaslämpötila oli liitoshetkellä 1538 °C, joka on vielä yli tähtäyksen. Senkassa olleen sulan kuitenkin tiedettiin olleen jo valukoneelle tullessa liian viileätä. Tämän vahvistaa ensimmäisenä mitattu väliallaslämpötila, 1531 °C, joka vastaa tähtäyslämpötilaa. Koska sula luonnollisesti jäähtyy jonkin verran valun aikana, oli odotettavissa että valunopeutta joudutaan nostamaan ja pahimmassa tapauksessa loppuporrastuksen tekeminen ei tulisi onnistumaan. Viimeisin mitattu väliallaslämpötila oli 1524 °C eli tuolloin oltiin jo 7° tähtäyslämpötilan alapuolella.

Valunopeus oli jo valun alussa 0.70 m/min ja lopussa korkeimmillaan 0.81 m/min. Tästä voitiin päätellä sulakartion pituuden olleen suuri ja CASIM:lla sen laskettiin olleen peräti 19.92 metriä lopetusporrastuksen aloittamishetkellä. Loppuporrastus aloitettiin 8 tonnin kohdalla ja 0.5 m/min:n valunopeus oli saavutettu, kun välialtaassa oli jäljellä 7 tonnia. Koska teräs oli lopussa hyvin kylmää oli odotettavissa että valu ei jatku loppuun saakka varsinkin pitkän koeporrastuksen

takia. 0.5 m/min:iin porrastus sujui kuitenkin ongelmitta ja 5 tonnin kohdalla valunopeus pudotettiin 0.44 m/min:iin. Kaikki sujui hyvin, kunnes 2.4 väliallastonin kohdalla kakkoslinja kuroi kiinni ja linjat pysäytettiin. Valu sujui siis ihan kohtalaisesti eikä altaaseen jäänyt kuin reilut puoli tonnia normaalia enemmän terästä. Loppuporrastus kesti noin 6.5 minuuttia ja sen aikana saatiin sulakartiota lyhennettyä 18.1 metriin.

Valunopeuden ollessa nollassa, pudotettiin ykköslinjan bloomijäähdytyksestä paineilmajäähdytys pois ja ainoastaan rullien minimivesijäähdytys jätettiin päälle. Kakkoslinjalla pidettiin sekä minimivedet että paineilmajäähdytys päällä. Tarkoituksena tällä oli, että paineilmajäähdytyksen pois pudottaminen valun ollessa pysähdyksissä antaisi sulalle paremman mahdollisuuden virrata jähmettyessä muodostuvaan kutistumisonkaloon. Kova jäähdytys heti kokillin alapuolella on omiaan muodostamaan siltaa bloomien keskelle sulakartioon, jolloin sekundääripipa syntyy.

Molemmilla linjoilla leikatut loppuromut olivat 160 senttiä pitkät ja myös molemmilta linjoilta havaittiin pipet. Kakkoslinjalla havaittiin vielä suurempi pipe kuin ykköslinjalla. Bloomit valssattiin teelmiksi ja tässä yhteydessä jouduttiin käytännön syistä leikkaamaan linjoilta häntäromuina 0.6 ja 1 m teelmää. Teelmät tarkistettiin ultraäänellä ja ykköslinjan kaikki teelmät menivät läpi tarkastuksesta. Viimeisimmissä teelmissä oli pientä huokoisuutta, mutta ei mitään niin vakavaa, että oltaisiin jouduttu tekemään romutusleikkauksia. Kakkoslinjan teelmistä toiseksi viimeisessä havaittiin pientä huokoisuutta ja viimeisessä teelmässä oli lopussa 30 sentin pipe, joka piti romuttaa.

Tuloksista voidaan päätellä, että lopetusporrastus näytti toimivan, sillä sulakartiota saatiin lyhennettyä lähes kaksi metriä ja vielä kohtalaisen lyhyessä ajassa. Myös jäähdytyspaineilman pois ottaminen ykköslinjalla näytti vaikuttavan positiivisesti, sillä ykköslinjan teelmistä ei löydetty loppupipeä. On muistettava että KV:llä jouduttiin leikkaamaan 60 sentin häntäromu eli tehty loppuromutus oli bloomilla noin 170 cm. Näin lyhyt loppuromu 25-hiilisellä laadulla ja vielä korkealla

loppuvalunopeudella valettuna pitäisi aineistokokeiden perusteella johtaa suureen pipeen, toisin kuitenkin kävi.

Kakkoslinjalla pidettiin paineilmat päällä koko liitoksen tekemisen ajan. Valukoneella tehty loppuromutus oli 160 cm, jonka lisäksi KV:llä jouduttiin romuttamaan noin metri teelmää. Näiden romutusten jälkeen viimeisestä teelmästä löydettiin TEK:ssä vielä 30 senttinen pipe. Yhteensä olisi tarvittu 186 cm:n pituinen bloomiromutus, jotta pipeä ei olisi esiintynyt. Tässä tapauksessa siis nykyisen käytännön mukainen loppuromutus olisi riittänyt pipen poistamiseksi. Vaikka kyseessä onkin vain yksittäisen kokeen tulos, niin vaikuttaisi siltä, että jäähdytyksen vähentäminen auttaisi vähentämään myös pipen esiintymisen todennäköisyyttä.

7 Pohdinta ja johtopäätökset

Suurin kysymysmerkki prosessissa pipen kannalta on valukoneella tehtävä pipehavainto. Aineistokokeissa oli 14 bloomissa 32:sta tehty pipehavainto. Neljästätoista pipemerkinnästä ainoastaan neljässä havaittiin pipe tai lievempää huokoisuutta. Toisin sanoen kymmenessä bloomissa siis oli tarpeeton P-merkintä. Mikäli näiden kohdalla olisi toimittu nykyisen toimintaohjeen määräämällä tavalla, olisi näistä kaikista romutettu karkeavalssaamalla viimeiset teelmät automaattisesti. Yhteensä siis kolmannes viimeisistä teelmistä olisi romutettu turhaan.

Jälkimmäisen lopetuskokeen aikana sulan yllilämpö oli huomattavan alhainen. Yleisesti epäiltiin, ettei loppuporrastus tule onnistumaan. Porrastus kuitenkin suoritettiin lähes loppuun asti, eikä jojoliitos ollut vaarassa epäonnistua. Tuloksena saatiin hyvin pitkästä sulakartiosta huolimatta lyhyehkö pipe. Tämän perusteella tuntuisi tärkeältä tutkia selkeät rajat, milloin porrastus tehdään ja milloin se ei enää tule onnistumaan.

Työssä tehdyt CASIM-simuloinnit sulakartion pituudelle valun lopetuksissa ja valuprosessin aikana on tehty ilman TEMPSIMU-taulukkoja eri materiaaleille. Tällöin ei siis eri laatujen vaikutusta sulakartion ja puuroalueen pituuksille voitu määrittää. Tämä tehtiin tarkoituksellisesti, sillä työmäärä oli käytetylläkin tavalla riittävä. Työn lopussa haluttiin kuitenkin varmistua laskettujen arvojen paikkaansapitävyydestä. Kullekin hiiliryhmälle tehtiin IDS:llä jähmettymismalli, jotka syötettiin TEMPSIMU:un. Näistä laskettiin tarkat arvot likvidus- ja soliduslämpötiloille vakiovalunopeudella 0.7 m/min. Sulakartion pituuksille saatiin hiiliryhmille 15, 25 ja 40 arvoiksi 17.4, 17.5 ja 18 metriä. Työssä oli käytetty sulakartion pituudelle arvoa 18 m samassa valunopeudessa, joten kaikkien laskettujen arvojen voidaan sanoa olevan hyvin lähellä 40-hiilisiä laatuja. 15- ja 25-hiilisillä työssä lasketut arvot ovat todellisuudessa hieman lyhyempiä, mutta erot ovat kuitenkin aika pieniä.

Mikäli jatkossa halutaan tutkia esim. puuroalueen pituuden vaikutusta tai ottaa käyttöön reaaliaikainen sulakartion ja puuroalueen pituuksien laskenta, olisi suositeltavaa tehdä eri lajiryhmille kullekin omat TEMPSIMU-taulukot IDS:n tietojen perusteella ja laskea niiden avulla tarkat arvot likvidus- ja soliduslämpötiloille.

Aineistokokeissa saatiin lähes ennakko-odotusten mukaisia tuloksia. Hiilipitoisuus vaikutti pipen muodostumiseen ja sen esiintymiseen teelmissä. 15-hiilisillä teräslaaduilla ei juuri pipeä esiintynyt ja P-merkityissä bloomeissa pipet menivät luultavasti valssatessa umpeen tai niin pieniksi, että TEKissä ei jouduttu romuttamaan yhtään teelmää. 25-hiilisillä laaduilla esiintyi eniten ongelmia ja ainoat varsinaiset piperomutukset tehtiin nimenomaan tämän hiilialueen laaduille. Hiilipitoisuuden vaikutusta pipen muodostumiseen horjuttivat hieman 40-hiiliset teräslaadut, joilla esiintyi yllättävän vähän pipeä. Näiden hyvän sisäisen laadun kuitenkin selitti sulakartioiden lyhyt keskimääräinen pituus valun lopussa. Vastaavasti 25-hiilisillä piperomutusten havaittiin johtuvan pitkästä sulakartiosta.

Eri hiiliryhmien tulosten vaihtelevuuden takia olisi hyvä, jos voitaisiin käyttää hieman erilaisia liitosromupituuksia tai muita romutussuosituksia eri laaduille. Esimerkiksi matalahiilisillä laaduilla on aineistokokeiden tulosten perusteella aivan turha romuttaa P-merkintäisen bloomin viimeistä teelmää KV:llä. Pipemerkintää voisi myös kehittää esimerkiksi määrittelemällä jotkut rajat sille, milloin havaittu pipe aiheuttaa romutuksia ja milloin se voidaan jättää huomioimatta.

Pipen vähentyminen valssauksessa ja jatkojalostuksessa on myös hyvä muistaa. Pipen esiintymisen vakavuus ja romutustarve voitaisiin määrittää sen mukaan, mitä tuotetta bloomista tullaan valmistamaan. Mitä suurempi on kaikkien työvaiheiden reduktio, sitä varmemmin pipe häviää. Ongelmaksi luultavasti muodostuisi se, ettei aina vielä valettaessa voida tietää, mitä kullekin bloomille tullaan jatkossa tekemään.

Kaikkein suuri apu olisi, jos olisi mahdollista saada prosessitietoihin mukaan sulakartion pituudet kullakin valuhetkellä. Tällöin tiedettäisiin heti, minkä pituisen

pipen muodostuminen on todennäköistä ja minkä pituisella liitosromulla se voidaan eliminoida.

Mikäli lopetusporrastuksen kesto saadaan käytännössä pidettyä samana, voidaan huomattavasti varmemmalta pohjalta tehdä tarvittavat loppuromutukset ja olla tietoinen pipen pituudesta kussakin tilanteessa. Liitosromun pituutta mietittäessä pitää toki ottaa huomioon myös muut tekijät kuten teräksen kuonapuhtaus. Mikäli lyhyemmällä loppuromutuksella saadaan terästä, jossa ei ole pipeä, mutta kuonan määrä on yli sallitun, on romutus varmasti liian lyhyt.

Jatkokokeessa kokeillun jäähdytyspaineilman poisottamista liitosvaiheessa kannattaisi kokeilla laajemmalla koesarjalla.

8 Yhteenveto

Jähmettymisonkalo eli pipe muodostuu bloomiin teräksen jäähtymisen ja jähmettymisen yhteydessä tapahtuvan kutistumien seurauksena. Pipe on valutuotteessa paha sisävikä ja se täytyy poistaa leikkaamalla. Varsinainen ongelma pipestä tulee siinä vaiheessa, jos se pääsee läpi tarkastuksista aina asiakkaalle menevään tuotteeseen asti.

Pipen muodostumisen todennäköisyyteen ja suuruuteen vaikuttaa kaikkein eniten sulakartion pituus valun loppuhetkillä. Suuri sulakartio sisältää enemmän jähmettyvää sulaa terästä ja luonnollisesti myös pipe on tällöin suurempi. Sulakartion pituuden määrää pääasiassa valunopeus. Sekundääripipet eli pylväsdendriittisillan eristämät erilliset huokokset ovat toinen pipen muoto.

Vaikean havaittavuuden ja joskus kaiken logiikan vastaisten esiintymisten takia on hyvä varmistaa, ettei minkäänasteista pipeä jää valutuotteeseen. Koska suurin pipe eli ns. loppupipe muodostuu vain valun lopetusten ja liitosten yhteyteen, niitä voidaan vähentää hidastamalla valunopeutta ennen valun loppua. Sekundääripipen muodostumista sulakartion kärjessä voidaan vähentää esimerkiksi erilaisilla reduktiomenetelmillä.

Aineistokokeessa sulakartion suuren vaikutuksen lisäksi huomattiin hiilipitoisuuden vaikuttavan pipen muodostumiseen. 15-hiilisillä ei esiintynyt minkäänlaista pipeä. 25-hiilisillä oli kaikkien pahimmat piperomutukset, tosin samalla on mainittava, että pahojen romutusten yhteydessä oli aina myös pitkä sulakartio.

Jatkokokeissa saatiin pidemmällä loppuporrastuksella lyhennettyä sulakartiota niin hyvin, että pipeä ei olisi nykyisellä liitosromupituudella esiintynyt ollenkaan. Lisäksi kolmessa tapauksessa neljästä aluksi tehty 160 sentin romuleikkaus oli täysin riittävä. Kokeissa tehty jäähdytyspaineilman nollaaminen liitoksen teon ajaksi osoittautui myös hyväksi ideaksi ja sitä, kuten myös kokeiltua loppuporrastusta kannattaa varmasti kokeilla laajemmalla koesarjalla.

Lähdeviitteet

- /1/ H. Fredriksson och U. Åkerlind. Gjutningens processteknologi, Del II. Institutionen för materialens process teknologi, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, Sverige, 1995, 306 s.
- /2/ S. Louhenkilpi. Jähmettyminen ja jatkuvavalu, opetusmoniste. Metallurgian laboratorio, Materiaali- ja kalliotekniikan osasto, Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi, 1992. 84 s. ISBN 951-22-1276-5.
- /3/ C.-M. Raihle, P. Sivesson and H. Fredriksson. Improving inner Quality and Yield in Continuous Casting. In: C.-M. Raihle: Pipe Formation and Macrosegregation in Steel Casting. Department of Materials Processing, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1993.
- /4/ H.-E. Wiemer, H. Jacobi und K. Wünnenberg. Einfluss von Erstarrungsgefüge und Giessgeschwindigkeit auf die Kernporosität verschiedener Stähle. Stahl und Eisen, 1995. Vol 115, nro 9, s. 67-76. ISSN 0340-4803.
- /5/ P. Sivesson, S. Wass and B. Rogberg. Improvement of centre porosity in continuously cast blooms by mechanical soft reduction at the end of the solidification process. In: Proceedings of the 3rd European conference on continuous casting. Madrid, Spain. October 20-23, 1998. Madrid, Spain: Unesid, 1998. s. 213-223.
- /6/ D.M. Stefanescu. Metals handbook, vol 15: Casting. 9th ed. 3rd pr, 1996. ASM International Metals Park, OH, 1988. 937 s. ISBN 0-87170-021-2
- /7/ Metals handbook, vol. 1: Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys. 10th ed. 4th pr, 1995. ASM International Materials Park, OH, 1990. 1063 s. ISBN 0-87170-377-7
- /8/ V. Lindroos, M. Sulonen ja M. Veistinen. Uudistettu Miekk-ojan Metallioppi. Keuruu, Suomi: Otava, 1986. 841 s. ISBN 951-666-216-1.
- /9/ T. Hätönen. Bloomin "pipen" pienentäminen. Imatra Steelin selvitys, TKE 70, 1990.
- /10/ K.-H. Tacke. Cavity Sequences in Continuously Cast Billets: Part I. Analysis of Empirical Data. Metallurgical and materials transactions B, August 1999. Vol. 30B, nro 4, s. 751-761. ISSN 0360-2141.
- /11/ K.-H. Tacke. Cavity Sequences in Continuously Cast Billets: Part II. Stochastic Models. Metallurgical and materials transactions B, August 1999. Vol. 30B, nro 4, s. 763-772. ISSN 0360-2141.

- /12/ G. Engström, H. Fredriksson and B. Rogberg. On the Mechanism of Macrosegregation in Continuously Cast Steels. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1983. Vol 12, nro 1, s. 3-12. ISSN 0371-0459.
- /13/ C.-M. Raihle and H. Fredriksson. On the Formation of Pipes and Centerline Segregates in Continuously Cast Billets. Metallurgical and Materials Transaction B, 1994. Vol 25B, nro 1, s. 123-133. ISSN 0360-2141.
- /14/ P. Havola. Hiiliterästen jähmettymisrakenteet sekä 0.2 % hiiltä sisältävien terästen jatkuvavaluhalkeamat. Licensiaattityö, Teknillinen Korkeakoulu. 1981. 127 s.
- /15/ M.C. Flemings. Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State. Metallurgical Transactions B, 1991. Vol 22B, nro 3, s. 269-293. ISSN 1073-5615.
- /16/ R. Alberny and J.P. Birat. Electromagnetic Stirring and Product Quality. In: Proceedings of International Conference of Continuous Casting of Steel, Biarritz, France, 1976. London, U.K.: The Metals Society, 1977. s. 116-124.
- /17/ H. Schrewe and J. Glaser. Continuous Casting of Rounds. In: Proceedings of International Conference of Continuous Casting of Steel, Biarritz, France, 1976. London, U.K.: The Metals Society, 1977.
- /18/ V. Manninen. Jähmettymisrakenteet ja mekanismit PC-teräksellä Koverharin valupraktiikoilla 130 mm teelmäkoolla. Koverhar /KEHI/ Dalsbruk Oy Ab 20.11.1990
- /19/ O. S. Kyung. Development of Soft Reduction Technology fo the Bloom Caster at Phoang Works of Posco. In: Proceedings of 78th Steelmaking Conference. Nashville, USA. April 2-5, 1995. USA: Iron and Steel Society, Inc, 1995. s. 301-308. ISBN 1-886362-00-9.
- /20/ H. F. Schrewe. Continuous Casting of Steel. Translated by P. Knighton. Düsseldorf, Germany: Verlag Stahleisen mbH, 1989. 194 s. ISBN 3-514-00389-0.
- /21/ T. Shumiya, M. Hirotaka, I. Katsuyoshi, H. Tomono and A. Mori. Improvement of Internal Quality of Large Section Concast Bloom with Soft Reduction. The Sumitomo Search, 1990. Nro 42, s. 25-31. ISSN 0585-9131.
- /22/ J. Miettinen, S. Louhenkilpi and J. Laine. IDS - Solidification analysis package, User manual, Windows version 1.3.1. Laboratory of Metallurgy, Helsinki University of Technology, 1997.

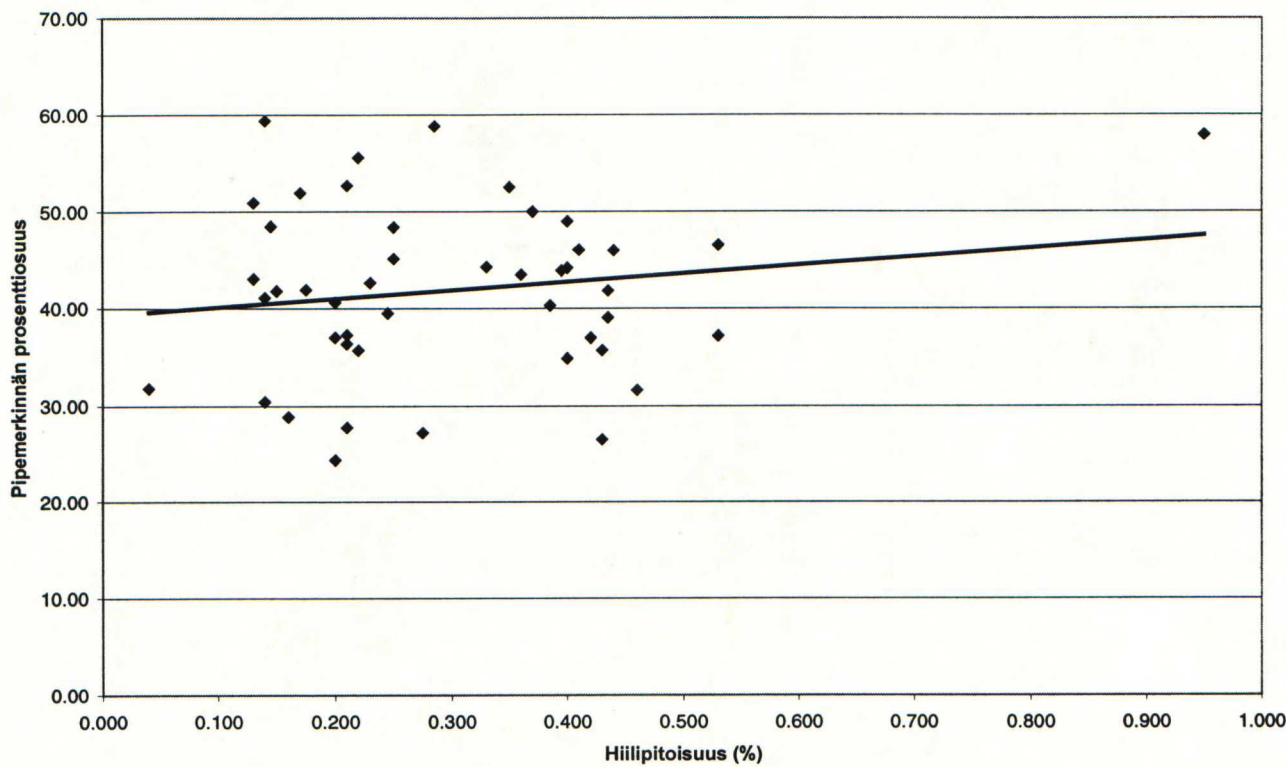
- /23/ J. Grönsfeld, H. Nilsson und H. Kohlhaage. Julkaisematon tutkimustulos, Mannesmannröhren-Werke AG. (Kirjassa: Metallurgie des Stranggiessens: Giessen und Erstarren von Stahl. Düsseldorf, Deutschland: Verlag Stahleisen mbH, 1992. ISBN 3-514-00350-5.)
- /24/ K. Wünnenberg and H. Jacobi. Besondere Verfahrenstechniken beim Stranggiessen von Stahl mit hoher Geschwindigkeit. Stahl und Eisen, 1984. Vol. 104, nro 23, s. 1213-1218. ISSN 0340-4803.
- /25/ H. Mori, N. Tanaka, N. Sato and M. Hirai. Macrostructure of and Segregation in Continuously Cast Steel Billets. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1972. Vol. 12, nro 2, s. 102-111.
- /26/ K. Wünnenberg und H. Jacobi. Julkaisematon tutkimustulos, Mannesmann Forschungsinstitut GmbH. (Kirjassa: Metallurgie des Stranggiessens: Giessen und Erstarren von Stahl. Düsseldorf, Deutschland: Verlag Stahleisen mbH, 1992. ISBN 3-514-00350-5.)
- /27/ T. Hätönen. Bloomien softreduktio maailmalla ja meillä. Imatra Steelin selvitys, KE 69, 1995.
- /28/ P. Siveson, C.-M. Raihle and J. Kontinen. Thermal Soft Reduction in Continuous Cast Slabs. In: C.-M. Raihle: Pipe Formation and Macroseggregation in Steel Casting. Department of Materials Processing, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1993.
- /29/ P. Antoine, M. Bobrie, J. M. Jolivet, J. Selaries, J. P. Birat, M. Bobadilla, J. Y. Lamant and M. Martinot. Prevention of Segregation in Continuous Casting of Steel. New Process and Industrial Development at Unimetal Neuves-Maisons Works. In: Proceedings of the 6th International Iron and Steel Congress. Nagoya, Japan, October 21-26, 1990. Vol. 3: Steelmaking 1. Tokio, Japan: Iron and Steel Institute of Japan, 1990. s. 301-308.
- /30/ A. Cristallini, A. Ferretti, R. Moretti and S. Simoni. Improvement of Billet Internal Quality by Means of Soft Reduction Technique. In: Proceedings of : Proceedings of 77th Steelmaking Conference. Chicago, IL, USA. March 20-23, 1994. USA: Iron and Steel Society, Inc, 1994. s. 309-315. ISBN 0-932897-93-2.
- /31/ S. Ogibayashi, M. Uchimura, K. Isobe, H. Maede, Y. Nishihira and S. Sato. Improvement of Center Segregation in Continuously Cast Blooms by Soft Reduction in the Final Stage of Solidification. In: Proceedings of the 6th International Iron and Steel Congress. Nagoya, Japan, October 21-26, 1990. Vol. 3: Steelmaking 1. Tokio, Japan: Iron and Steel Institute of Japan, 1990. s. 271-278.

- /32/ K. Kushida, T. Fujimura, F. Sudo, H. Mizota, T. Matsukawa and S. Kojima. Improvement of Centerline Segregation in Continuously Cast Strand by Continuous Forging Process. In: Proceedings of the 6th International Iron and Steel Congress. Nagoya, Japan, October 21-26, 1990. Vol. 3: Steelmaking 1. Tokio, Japan: Iron and Steel Institute of Japan, 1990. s. 293-300.
- /33/ M. Hattori, S. Nagata, A. Inaba, T. Yamamoto, T. Okada and M. Zeke. New Technology to Tackle Centerline Segregation. In: P.H. Scholes (ed.). Steel Technology International 1990/91. London, U.K.: Sterling Publications International Ltd, 1990. s. 189-193. ISSN 0953-2412.
- /34/ J. Partinen. Electromagnetic Stirring in Continuous Casting of Steel: Theory, Mathematical and Physical Modeling. Licenciate Thesis, Helsinki University of Technology, 1993.
- /35/ E. Förster, G. Rudolph und K. Stercken. Einsatz elektromagnetischer Rührer in der Sekundärkühlzone einer Knüppelstranggiessanlage. Stahl und Eisen, 1982. Vol. 103, nro. 25-26. s. 1277-1284. ISSN 0340-4803.
- /36/ C.-M. Raihle. Formation of White Bands When Using Electro-Magnetic Stirring in Continuous Casting. In: C.-M. Raihle: Pipe Formation and Macrosegregation in Steel Casting. Department of Materials Processing, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1993.
- /37/ C.-M. Raihle. Electro-Magnetic Stirring at the End of the Solidification. In: C.-M. Raihle: Pipe Formation and Macrosegregation in Steel Casting. Department of Materials Processing, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1993.
- /38/ S. Wilmotte and P. Naveau. High Speed Casting of Blooms and Billets at Near-Liquidus Temperature. In: Proceedings of 6th International Continuous Casting Conference. Linz, Austria. May 24-26, 1993. Linz, Austria: Voest-Alpine Industrianlagenbau GmbH, 1993.
- /39/ A. Shiraishi, K. Iwata, H Tomono, T. Nagahata and A. Mori: Improvement of Internal Quality by Stable Casting Under Low Teeming Temperature Using Tundish Induction Heater. Iron and Steel Society, Tundish Metallurgy, 1991. Vol. II, s. 121-127.
- /40/ D. Camacho, J. Troutman and D. Check. Plasma Tundish Heating at Nucor Norfolk: Design Considerations and Operating Results. In: Proceedings of 78th Steelmaking Conference. Nashville, USA. April 2-5, 1995. USA: Iron and Steel Society, Inc, 1995. s. 321-329. ISBN 1-886362-00-9.

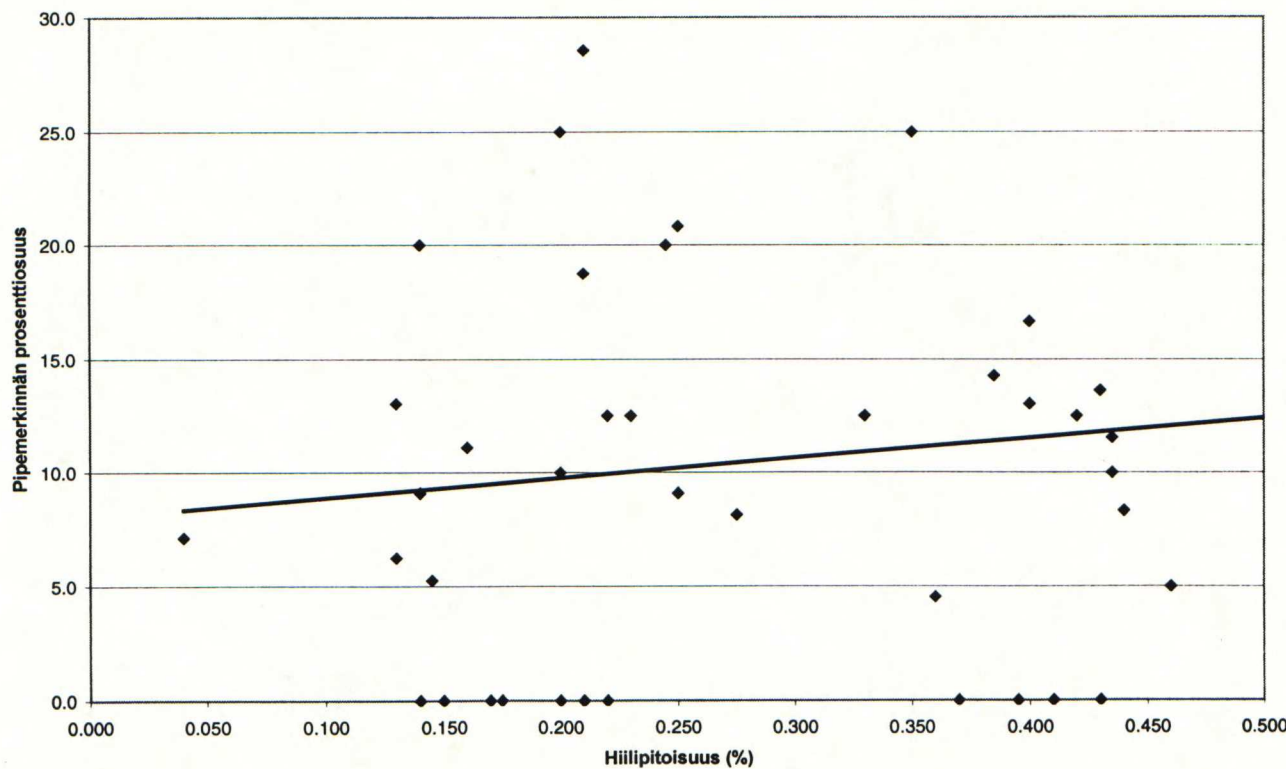
- /41/ D. Ameling, H. Litterscheidt, K. Schwerdtfeger and D. Senk. Effect of Sharp Cooling on the Structure and Macrosegregation of Continuously Cast Billets. In: Proceedings of 69th Steelmaking Conference. Warrendale, PA, USA: Iron and Steel Society, Inc, 1986. s. 387-395.
- /42/ J. Martikainen. Ultraäänikurssi syksyllä 1988. Imatra Steel.

Tilastollisesti tutkitut pipemerkinnät eri hiilipitoisuuksilla kullakin liitostyyppillä

Kaikki liitostavat

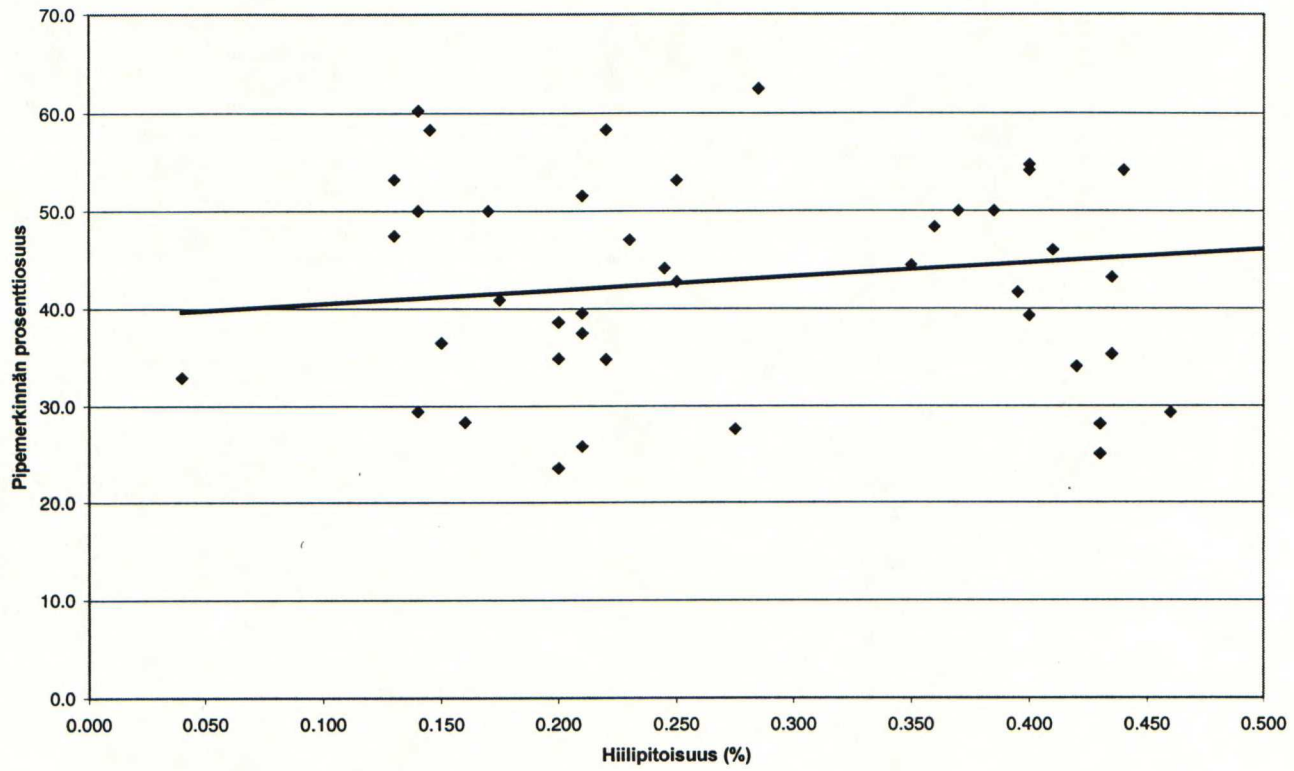


Lopetusvalut

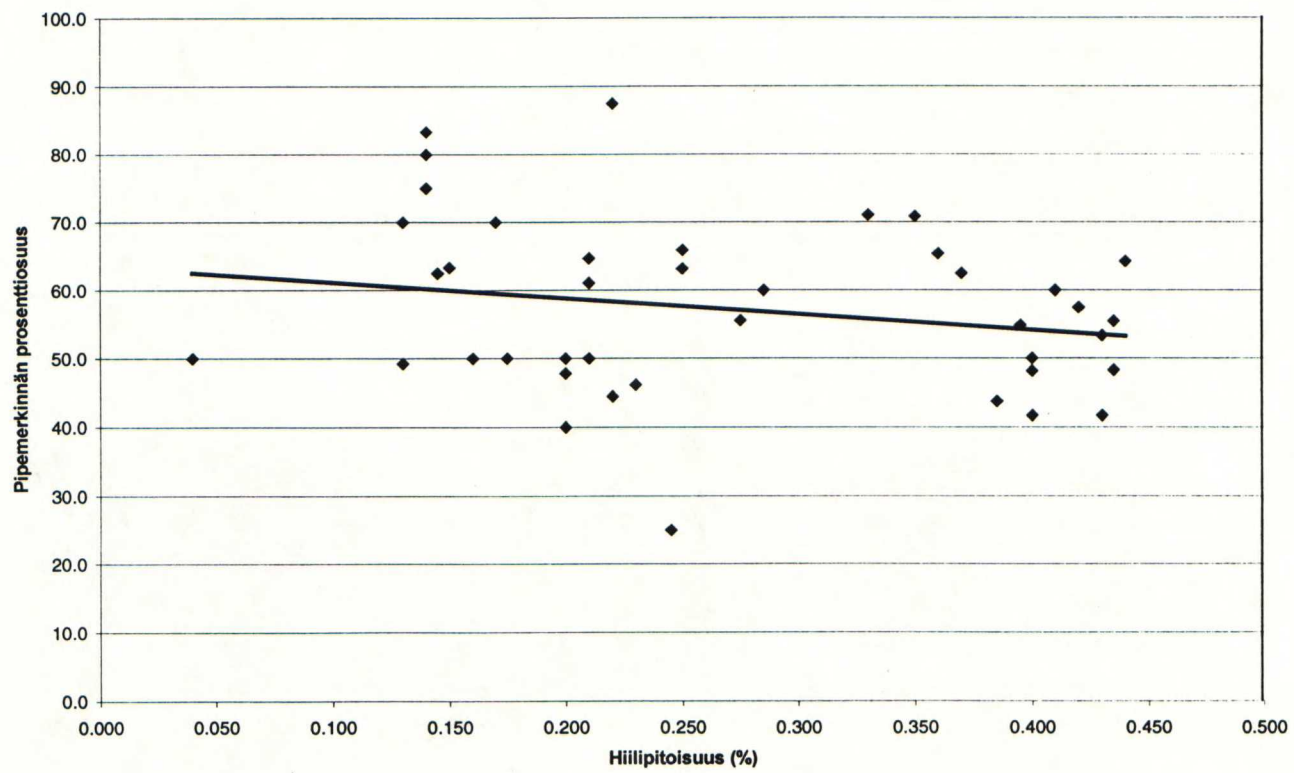


Tilastollisesti tutkitut pipemerkinnät eri hiilipitoisuuksilla kullakin liitostyyppillä

Jojoliitokset



Altaanvaihdot

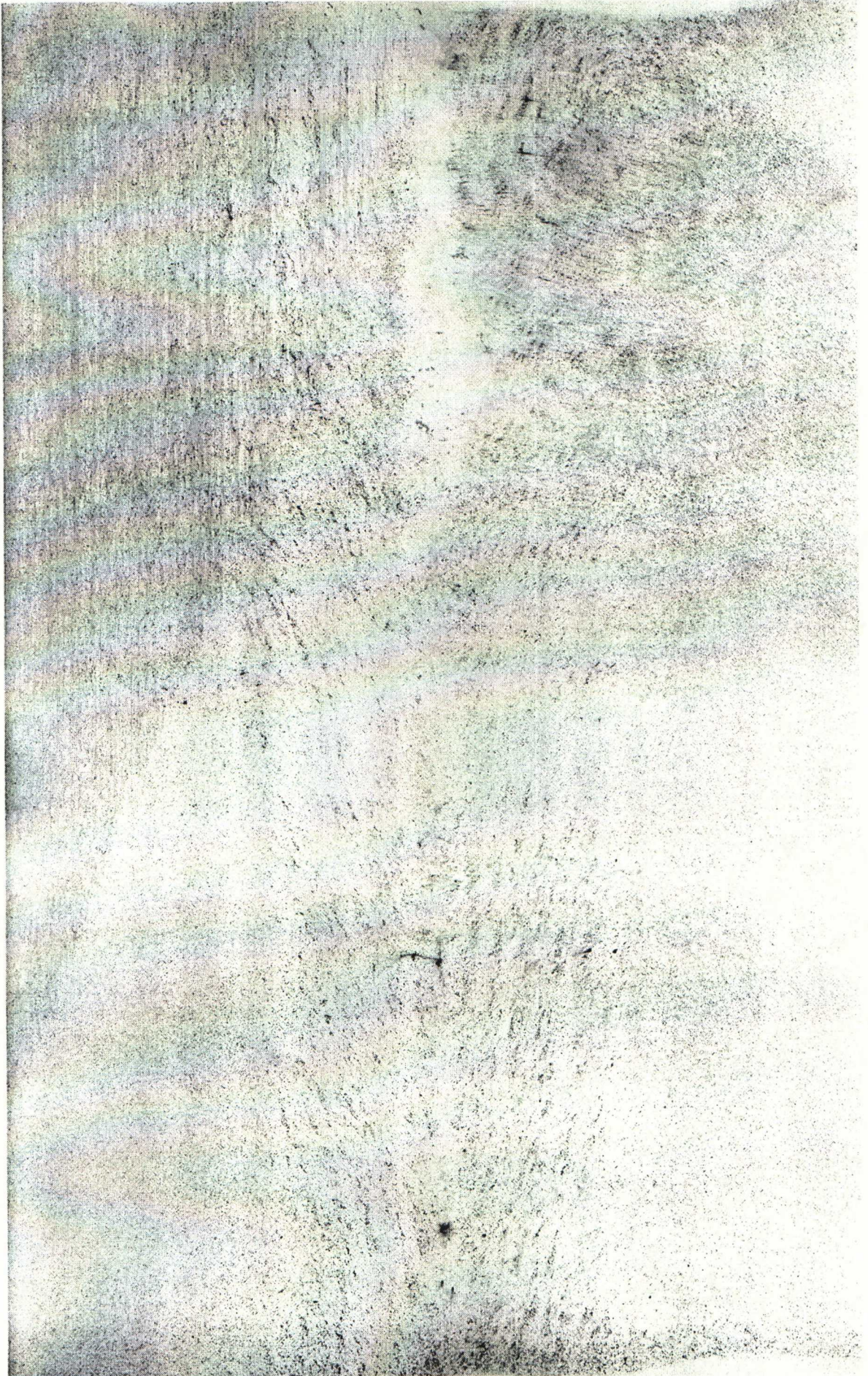




Bloomipalan 4 halkaisupinnan Bauman-kuva



Bloomipalan 5 halkaisupinnan Bauman-kuva



Bloomipalan 6 halkaisupinnan Bauman-kuva



Bloomipalan 7 halkaisupinnan Bauman-kuva